



تحلیل پارامتریک و ترمودینامیکی تولید برق در ایستگاه های تقلیل فشار گاز با بهره گیری از توربو اکسپندرهای مبتنی بر انرژی زمین گرمایی

میرها تف سیدولیلو*
پژوهشگر

روح الله

محمد تقی پور

پژوهشگر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری دفاعی شمالغرب

علی عارضی

کارشناس ارشد، مهندسی شیمی، دانشگاه پیام نور، تهران

چکیده: توجه به مخاطرات زیست محیطی انرژی های سنتی به ویژه پدیده گرمایش زمین ناشی از انتشار و متمرکز شدن گازهای گلخانه ای از اصلی ترین دلایل توجه به انرژی های نو است و دولت ها را بر آن داشته تا بهره مندی از منابع جدید انرژی را با جدیت در دستور کار قرار داده و برای آن برنامه ریزی کنند. از طرفی با توجه به جایگزینی سوخت های فسیلی توسط انرژی های تجدید پذیر و روش های نوین تولید برق، شایسته است که پتانسیل های موجود همانند اتلاف انرژی ناشی از تقلیل فشار گاز در ایستگاه های تقلیل گاز شهری مورد نظر و بررسی قرار گیرد. از این رو در مقاله حاضر سعی شده است تا با استفاده از یک توربو اکسپندر در یک ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری، به تولید انرژی الکتریسیته پرداخته شود. گاز ورودی به این توربو اکسپندر نیز توسط انرژی زمین گرمایی پیش گرم می شود تا توان تولید کار در آن افزایش یابد. نتایج حاکی از آن است که ایده آل ترین راندمان آیزنتروپیک (برابر با ۹۰٪)، در دمای ورودی توربو اکسپندر برابر با ۸۰ درجه سانتی گراد و میزان پیش گرمایش برابر با ۱۸۶/۵ kJ/kg اتفاق می افتد. همچنین افزایش میزان پیش گرمایش گاز طبیعی سبب افزایش دمای توربین انبساطی شده و در نتیجه توان تولیدی افزایش می یابد.

واژه های راهنما: توربو اکسپندر، تقلیل فشار گاز، تحلیل ترمودینامیکی، تحلیل پارامتریک، انرژی زمین گرمایی

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۲

Mir hatef
Seyedvalilu*
Researcher

Ruhollah
Mohammad
Taghipour

Researcher,
Malik Ashtar University
of Technology,
Northwest Science and
Technology Research
Institute

Ali Arezi
M.Sc., Chemical
Engineering, Payam
Noor University, Tehran

Parametric and thermodynamic analysis of electricity production in gas pressure reduction stations using turbo expanders based on geothermal energy

Abstract: Paying attention to the environmental hazards of traditional energies, especially the phenomenon of global warming caused by the release and concentration of greenhouse gases, is one of the main reasons for paying attention to new energies and it has prompted the governments to seriously put the benefit of new sources of energy on the agenda and plan for it. On the other hand, it is appropriate that existing potentials such as energy loss due to gas pressure reduction in urban gas reduction stations should be considered and investigated. Therefore, in this article, it has been tried to produce electricity by using a turbo expander in a municipal gas pressure reduction station. The gas input to this turbo expander is also preheated by geothermal energy to increase the work production capacity. The results indicate that the most ideal isentropic efficiency (equal to 90%) occurs at the turbo expander inlet temperature equal to 80 degrees Celsius and the amount of preheating equal to 186.5 kJ/kg. Also, increasing the amount of natural gas preheating increases the temperature of the expansion turbine and as a result, the production power increases.

Keywords: Turbo expander, Gas pressure reduction, Thermodynamic analysis, Parametric analysis, Geothermal energy

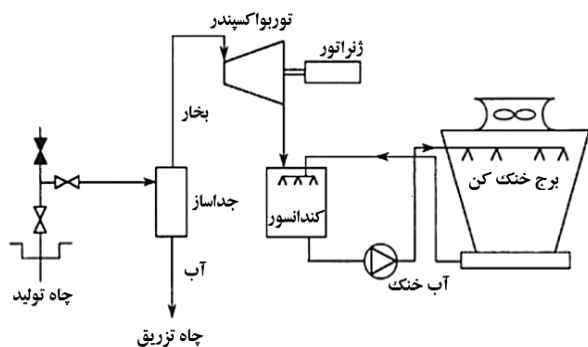
۱- مقدمه

مصرف روز افزون انرژی حاصل از سوخت های فسیلی بواسطه انتشار آلاینده های حاصل از احتراق سوخت های فسیلی و افزایش دی اکسید کربن در اتمسفر و پیامدهای ناشی از آن، محیط زیست را با تغییرات تهدید آمیزی روبرو ساخته است [۱]. از دیگر سوی محدودیت منابع فسیلی، غیرقابل تجدیدپذیر بودن این منابع و پیش بینی افزایش قیمت ها موجب گردیده است تا سیاست گذاران و برنامه ریزان بخش انرژی به فکر بهینه سازی مصرف سوخت و همچنین انرژیهای جایگزین باشند. در این بین استفاده از انرژی های پاک نظیر زمین گرمایی و همچنین بکارگیری انرژی های تلف شونده نظیر جلوگیری از اتلافات در رگولاتورهای فشار گاز شهری با استفاده از توربو اکسپندر راه گشای قسمتی از معضلات فوق الذکر خواهد بود [۲-۵]. با توجه به توضیحاتی که داده شد، استفاده از توربو اکسپندر به جای رگولاتور فشار (فشار شکن) در ایستگاههای تقلیل فشار گاز شهری هدف اصلی این مقاله است. در این حالت به جای هدر رفتن انرژی گاز شهری می توان در یک توربو اکسپندر علاوه بر کاهش فشار گاز، کار مکانیکی تولیدی را با وصل نمودن آن به یک ژنراتور، به برق تبدیل کرد. در این بررسی همچنین گاز ورودی به توربو اکسپندر توسط انرژی زمین گرمایی محل که توسط یک ترموسیفون بلند با جریان دوفازی بسته به سطح زمین انتقال می یابد پیش گرم می شود. بدین طریق از پتانسیل انرژی زمین گرمایی محل نیز برای تولید برق استفاده می شود. فرایند انبساط گاز در توربو اکسپندر همراه با افت دماست. بنابراین مطابق شکل (۱) می توان در ورودی گاز پر فشار به آن گرما تحویل داد. این گرما می تواند از طریق انرژیهای پاک نظیر انرژی خورشیدی و یا زمین گرمایی تامین شود. از آنجا که در اکثر نقاط ایران پتانسیل زمین گرمایی و سابقه آتشفشانی مناسبی وجود دارد، بنابراین یکی از بهترین روش های تامین گرما انرژی زمین گرمایی می باشد. در این راستا تحقیقات گسترده ای صورت گرفته است که از جمله آنها می توان به موارد مهم زیر اشاره نمود.

هووارد و همکارانش [۶] در یک کار تحقیقاتی، اقدام به نصب یک توربو اکسندر در ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری نمودند و نتایج حاصل از کار آن ها حاکی از این بود که افزودن پیل سوختی به سیستم تقلیل فشار گاز شهری باعث افزایش راندمان این سیستم تا حدود ۱۰٪ خواهد شد. تیان وی و همکارانش [۷] به بررسی و مطالعه عددی و تجربی بر روی پایداری توربو اکسپندر برودتی پرداختند. در مقاله ایشان، مدل المان محدود

یک توربو اکسپندر ۱۵۰ نیوتن متر مکعب بر ساعتی با استفاده از یک یاتاقان برای جداسازی هوا برای یک مطالعه موردی پیکربندی شده است. تأثیر سختی ساختاری یاتاقان و ویژگی های میرایی بر روی سیستم بلبرینگ روتور فویل برای عملکرد پایدار ارزیابی شد. با ضرایب آزمایش شده، عملکرد روتور دینامیکی سیستم حامل روتور به صورت عددی تحلیل شده و با نتایج تجربی گذرا مقایسه گردید. همچنین ژو و همکارانش [۸] به بررسی و کنترل کارایی فرآیند خنک سازی یک توربو اکسپندر هلیوم برودتی برای یک مایع ساز هیدروژنی پرداختند. نتایج تجربی نشان داد که نسبت مشخص منبسط کننده به طور قابل توجهی در طول فرآیند خنک سازی تغییر می کند که منجر به انحراف زیادی از بازده بهینه می شود. در این کار تاثیر فشار ترمز بر نسبت مشخصه و کارایی توربو انبساط کننده هلیوم مورد مطالعه قرار گرفته و یک روش کنترل فشار متغیر برای عملکرد کارآمد توربو اکسپندر در طول فرآیند خنک سازی یک مایع ساز هیدروژنی پیشنهاد شده است. با تحلیل نتایج مشخص گردید که در مقایسه با روش کنترل فشار ترمز ثابت، روش کنترل فشار متغیر می تواند راندمان منبسط کننده را ۵٪ تا ۱۰٪ در طول فرآیند خنک سازی در منطقه دمای بالا افزایش دهد.

کنکمان و آکمان [۹] در یک توربو اکسپندر به بررسی ادغام شبکه ای از مبدل های حرارتی جهت بازیابی اتان پرداختند. ایشان جهت مطالعه بر روی عملکرد و بازده این سیستم، به شبیه سازی سیستم یکپارچه مذکور پرداختند. تریپاتی و همکارانش [۱۰] نتیجه گرفتند که استفاده از منبع زیست توده با اینکه باعث کاهش انتشار گاز دی اکسید کربن خواهد شد ولی از طرف دیگر تلفات انرژی در این حالت نسبت به نیروگاه های مبتنی بر ذغال سنگ بسیار بیشتر خواهد بود. زهتابیان و همکارانش [۱۱] طی یک کار مطالعاتی به بررسی گاز ورودی به شهر قزوین پرداختند و نتیجه گرفتند که نوسانات گاز ورودی به شهر بر روی بازده سیستم گاز رسانی تاثیر خواهد گذاشت. نتایج حاصل از این کار نشان داد که بازده واقعی سیستم توربو اکسپندر برابر ۶۸٪ خواهد بود. بهره گیری از توربو اکسپندر در صنایع مختلف، در فرایندهای خنک کاری، مایع سازی گاز، رانش کمپرسور و ... ، دارای تاریخچه طولانی می باشد ولی بهره گیری از این سیستم ها جهت تولید برق به تحقیقات بسیار اندکی محدود می شود [۱۲-۱۵]. از این رو با توجه به تحقیقات انجام یافته در حوزه استفاده از توربو اکسپندر در ایستگاه های تقلیل فشار گاز، در کار حاضر پارامترهای تاثیرگذار بر این سیستم ها و میزان تاثیر پذیری راندمان و کار تولیدی در این سیستم ها مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.



شکل ۲ نمای ساده شده فرآیند استحصال انرژی از زمین گرمایی بوسیله توربین انبساطی

در شکل (۲) ملاحظه می کنید که کمپرسور و خنک کننده خارجی به عنوان یک کمپرسور دما ثابت در دمای T_2 با بازده E_e کار می کند. فرض کنید یک افت فشار و اختلاف دمای ناچیز در مبدل حرارتی (بطور طبیعی فقط چند درجه) وجود داشته باشد و فرض کنید که سیال گردشی یک گاز کامل باشد. همچنین در نظر بگیرید که یک مقدار گرما بصورت Q_e در دمای میانگین پایین T_1 توسط توربوماشین خارج شود. این کار نیازمند آن است که توربوماشین کاری معادل با W_e به شفت منتقل کند. اگر بازده منبسط کننده را در طول عملیات η_c فرض کنیم، کار ایده آل عبارت است از:

$$DH = Q_e / h_e \quad (2)$$

کار انبساط تئوری (دما ثابت) در کمپرسور برابر است با:

$$\frac{Q_e \cdot T_2}{h_e \cdot T_1} \quad (3)$$

کار انبساط واقعی کمپرسور W_e ، کمیت نهایی تقسیم بر بازده دما ثابت کمپرسور η_c است: بنابراین،

$$W_e = \frac{Q_e \cdot T_2}{h_e \cdot T_1} \quad (4)$$

کار مکانیکی معادل با Q_e به کمپرسور برمی گردد. بنابراین کار خالص کمپرسور برابر است با:

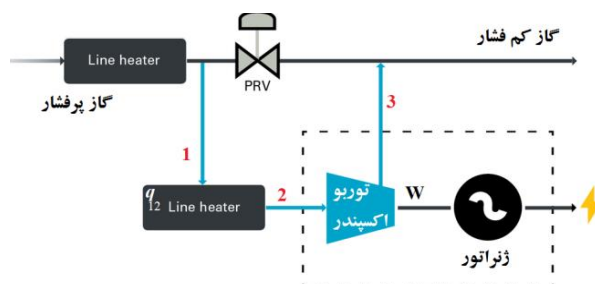
$$W = W_e - Q_e = Q_e \left[\frac{T_2}{h_e T_1} - 1 \right] = Q_e \frac{T_2 - h_e T_1}{h_e T_1} \quad (5)$$

کار تئوری طبق قانون دوم عبارتست از:

$$W_{theor.} = Q_e \frac{T_2 - T_1}{T_1} \quad (6)$$

۲- بیان مسئله و معادلات حاکم

شکل (۱) طرحی از توربو اکسپندر که در ورودی، گاز پر فشار را به همراه گرما گرفته و در خروجی گاز کم فشار را به همراه برق تحویل می دهد، نشان می دهد.



شکل ۱ طرحی ترمودینامیکی استحصال برق در ایستگاه تقلیل فشار گاز، به وسیله توربو اکسپندر

طرحی ترمودینامیکی از مدل ارائه شده به صورت شکل (۱) می باشد که q_{1-2} انرژی حاصل از حرارت زمین گرمایی است که توسط ترموسیفون جریان دو فازی بسته تامین شده و برای پیش گرمایش گاز ورودی به توربواکسپندر با واحد kJ/kg استفاده می شود. همچنین W کار ویژه تولیدی در سیکل توسط توربواکسپندر با واحد kJ/kg می باشد. در این محاسبات دبی جرمی سیال گازی در نظر گرفته شده و نسبت تولید انرژی به صورت زیر تعریف می شود:

$$e = \frac{W}{q_{12}} \quad (1)$$

متغیرهای غیر وابسته در این طرح دمای گاز بعد از پیش گرمایش و کارایی آیزنتروپیک توربواکسپندر می باشند.

۲-۱- محاسبه بازده توربواکسپندر

در یک چرخه دوتایی شکل (۲) نوع فرایند تولید توان به این صورت است که آب داغ توسط پمپ کردن از چشمه های زیرزمینی در سرتاسر سیستم حرارتی جریان می یابد تا یک مایع واسط را که درون یک چرخه بسته قرار دارد به جوش آورد. بخار حاصل منبسط می شود تا ژنراتور توربین را به حرکت درآورد و سپس بازچگالیده شده و به داخل مبدل حرارتی بازگردانده می شود تا چرخه را تکرار کند. این انبساط بخار، برق قابل عرضه تولید می کند، بنابراین بازده قابل توجه خواهد بود. برخی مایعات واسط برای چرخه های دوتایی مناسب هستند، و این مایعات شامل ایزوبوتان، ایزوپنتان، پروپان، و ترکیبات هیدروکربنی خاص می باشند.

جدول ۱ نتایج شبیه‌سازی نصب توربین انبساطی طرح مورد نظر

داده های ورودی								
خواص گاز طبیعی در مرحله ورودی								
شماره ستون	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	
دبی جریان	Nm ³ /h	۶۰۰۰	۶۰۰۰	۶۰۰۰	۶۰۰۰	۶۰۰۰	۶۰۰۰	۶۰۰۰
دما	C°	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
فشار	Mpa	۵/۵	۶/۳	۴/۵	۵/۵	۵/۵	۵/۵	۵/۵
خواص گاز طبیعی در مرحله خروجی								
دما	C°	۳	۳	۳	۳	-۷	۱۳	
فشار	Mpa	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۴	۲/۳	۱/۸	۱/۸

بنابراین بازده نیز طبق قانون دوم برابر است با:

$$\begin{aligned} \frac{W_{theor.}}{W} &= \frac{(T_2 - T_1) h_e h_c}{T_2 - h_e h_c T_1} = \frac{h_e h_c T_2 - h_e h_c T_1}{T_2 - h_e h_c T_1} \\ &= \frac{T_2 - h_e h_c T_1 + (h_e h_c - 1) T_2}{T_2 - h_e h_c T_1} \\ &= 1 - \frac{T_2 (1 - h_e h_c)}{T_2 - h_e h_c T_1} \end{aligned} \quad (7)$$

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- اعتبارسنجی و ارزیابی مدل سازی انجام شده

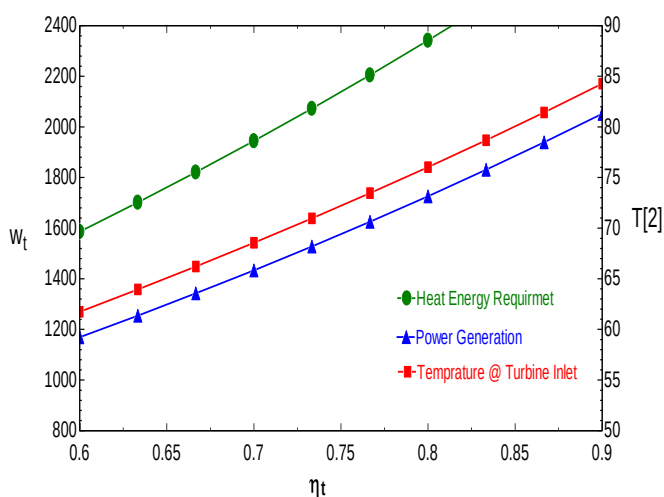
برای ارزیابی و بررسی میزان دقت مدل سازی انجام گرفته (اعتبارسنجی)، نتایج حاصل از مدل فوق با نتایج موجود در مراجع مربوطه مقایسه خواهد شد. مقایسه نتایج این مدل با مدلی که توسط Poživil و همکاران وی [۱۶] انجام گرفته، در جدول (۱) آورده شده است: ترکیب گاز مورد بررسی در طرح مورد نظر از نوع گاز طبیعی روسیه با درصد های حجمی ۰.۹۶٪ CH₄، ۰.۰۶٪ C₂H₆، ۰.۰۲٪ C₃H₈، ۳.۱٪ N₂، ۰.۱٪ Co₂ می باشد.

این مقایسه برای حالت ۱ در جدول (۲) انجام گرفته است که در آن دبی گاز ورودی به سیکل برابر ۶۰۰۰ Nm³/h و دما و فشار ورودی به توربین انبساطی به ترتیب برابر ۳ °C و ۵/۵ Mpa بوده و همچنین دما و فشار خروجی از آن به ترتیب ۳ °C و ۱/۸ Mpa می باشد.

۳-۲- میزان تاثیر راندمان آیزنتروپیک توربین انبساطی

بر سه پارامتر اصلی سیکل

در انتهای این مقایسه با توجه به شبیه سازی انجام شده تاثیر راندمان آیزنتروپیک توربین انبساطی را بر روی سه پارامتر دیگر که عبارتند از: میزان انرژی مورد نیاز برای پیش گرمایش گاز



شکل ۳ میزان تاثیر راندمان آیزنتروپیک توربین انبساطی بر سه پارامتر W_t , T_3 , H_{req}

۳-۳- مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی طرح با نتایج Kowala

در ادامه برای بررسی و تحقیق بیشتر روی طرح مورد مطالعه مقایسه دیگری با کار Kowala [۱۷] صورت گرفته که نتایج آن در جدولی به صورت جدول (۳) آورده شده است. در این مقایسه نوع گاز طبیعی مورد استفاده از نوع متان خالص CH₄ بوده و دبی آن نیز ۱ kg/s در نظر گرفته شده است.

جدول ۲ مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج کار Pozivil [۱۶] برای حالت ۱

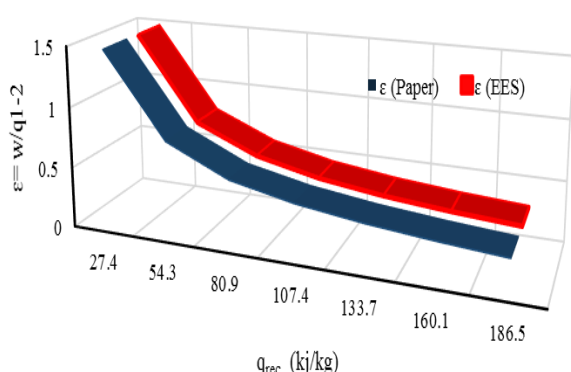
واحد	نماد	Pozivil[14]	مدل مورد نظر	درصد خطا %
C°	T_2	۷۱/۳	۷۵/۷۱	۶/۱۸
kw	q_{1-2}	۱۹۳۹	۱۸۹۰	۲/۵۲
kw	W	۱۳۶۷	۱۳۹۳	۱/۹
%	ε	۷۰/۵	۷۳/۷۲	۴/۵۶

در ادامه تاثیر میزان پیش‌گرمایش گاز بر نسبت تولید انرژی محلی (ε) مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴ مقایسه نتایج توان تولیدی از طرح مورد مطالعه با نتایج Kowala [۱۷] در راندمان $\eta_t = 10\%$

درصد خطا	مدل مورد نظر	Kowala[15]	ε
-	-	-	For $q_{1-2}=0.00$
۰/۸ %	۱/۴۶۸	۱/۴۸	For $q_{1-2}=27.40$
۲ %	۰/۷۷	۰/۷۹	For $q_{1-2}=54.30$
۰/۱ %	۰/۵۴۹	۰/۵۵	For $q_{1-2}=80.90$
۱ %	۰/۴۳۲	۰/۴۴	For $q_{1-2}=107.4$
۲ %	۰/۳۶۲	۰/۳۷	For $q_{1-2}=133.7$
۱ %	۰/۳۱۵	۰/۳۲	For $q_{1-2}=160.1$
۰/۰ %	۰/۲۸	۰/۲۸	For $q_{1-2}=186.5$

شکل (۵) نتایج عددی ارائه شده در جدول (۴) را بصورت نمودار نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از این مدل‌سازی تطابق بسیار مناسبی با نتایج کار تجربی دارد و همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش میزان پیش‌گرمایش گاز، نسبت تولید انرژی محلی در سیستم کاهش می‌یابد.

epsilon vs. q_{rec} ($\eta_t=30\%$)

شکل ۵ مقایسه نتایج بدست آمده با مقاله مرجع [۱۷] - تاثیر میزان پیش‌گرمایش گاز بر نسبت تولید انرژی محلی

نهایتاً به مطالعه تاثیر میزان پیش‌گرمایش بر دمای گاز خروجی توربین انبساطی (T_3) پرداخته شده که نتایج آن در جدول (۵) آورده شده است.

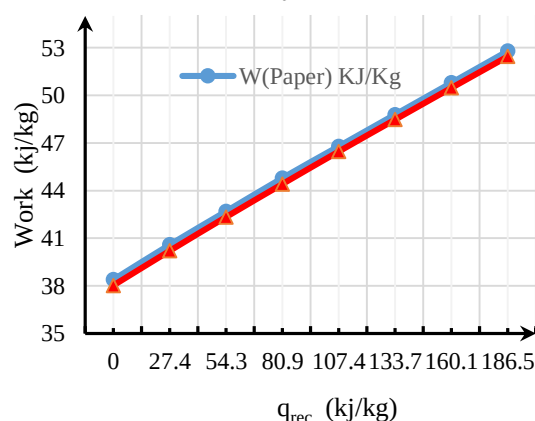
۳-۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی تاثیر میزان پیش‌گرمایش گاز بر پارامترهای سیستم ($\eta_t = 30\%$)

در این بخش به مطالعه تاثیر میزان پیش‌گرمایش گاز بر توان تولیدی توربین انبساطی، نسبت تولید انرژی محلی و دمای گاز خروجی توربین انبساطی پرداخته شده که تمامی مطالعات در شرایط بازده توربین ۳۰٪ انجام شده است. مقایسه نتایج توان تولیدی حاصل از شبیه‌سازی این مقاله با نتایج کوالا [۱۷] در جدول (۳) نمایش داده شده است.

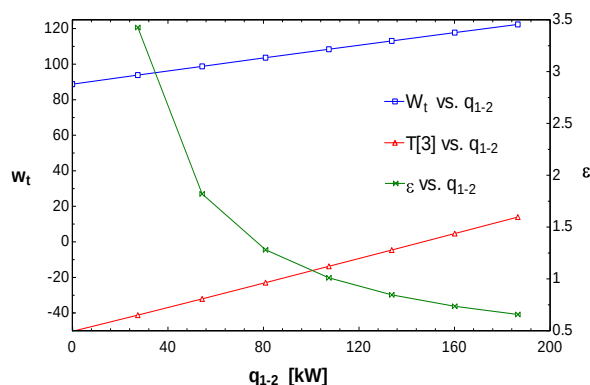
جدول ۳ مقایسه نتایج توان تولیدی (kw) حاصل از شبیه‌سازی این مقاله با نتایج Kowala در راندمان $\eta_t = 30\%$

درصد خطا	مدل مورد نظر	Kowala[15]	q_{1-2}
۰/۹ %	۳۸/۰۳	۳۸/۴	$q_{1-2}=0.0$
۰/۹ %	۴۰/۲۱	۴۰/۶	$q_{1-2}=27.4$
۰/۸ %	۴۲/۳۴	۴۲/۷	$q_{1-2}=54.3$
۰/۶ %	۴۴/۴۲	۴۴/۸	$q_{1-2}=80.9$
۰/۸ %	۴۶/۴۷	۴۶/۸	$q_{1-2}=107.4$
۰/۶ %	۴۸/۴۸	۴۸/۸	$q_{1-2}=133.7$
۰/۶ %	۵۰/۴۸	۵۰/۸	$q_{1-2}=160.1$
۰/۶ %	۵۲/۴۶	۵۲/۸	$q_{1-2}=186.5$

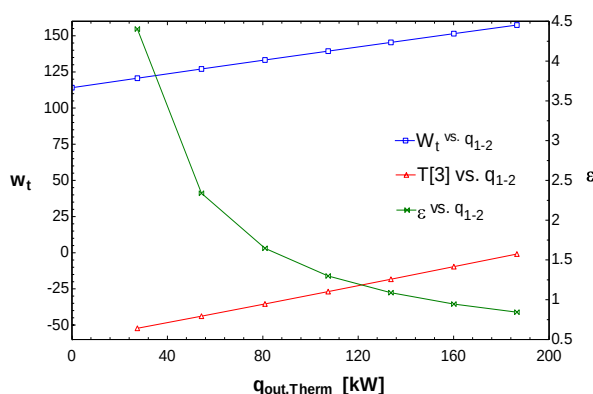
نتایج عددی اشاره شده در جدول (۳)، به صورت نموداری در شکل (۴) آورده شده است.

For $\eta_t = 30\%$ 

شکل ۴ مقایسه نتایج بدست آمده با مقاله مرجع [۱۷] - تاثیر میزان پیش‌گرمایش گاز بر توان تولیدی توربین انبساطی



شکل ۷ تاثیر میزان پیش گرمایش در راندمان ۷۰٪ توربین انبساطی



شکل ۸ تاثیر میزان پیش گرمایش در راندمان ۹۰٪ توربین انبساطی

۳-۶- تحلیل قانون دوم

تحلیل قانون اول، ارزیابی کاملی از سیستم را به علت حساب نکردن فشار گاز ارائه نمی‌دهد. اطلاعات بیشتر از تحلیل قانون دوم به دست می‌آید.

$$h_B = \frac{\dot{m}(w+b_3)}{\dot{m}b_1 + \dot{m}_f b_f} \quad (8)$$

که در رابطه بالا b_1 و b_3 انرژی گاز در مراحل ۱ و ۳ می‌باشند و در هر حالت به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$B_i = I_i - I_0 - T_0(S_i - S_0) \quad (9)$$

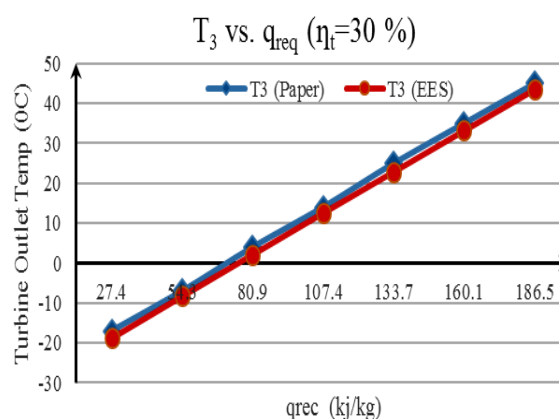
همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش میزان پیش گرمایش گاز طبیعی دو اتفاق در خلاف جهت هم می‌افتد. یکی افزایش میزان تولید توان توسط توربین انبساطی و دیگری، کاهش راندمان قانون دوم و در کنار آن کاهش نسبت تبدیل انرژی است. این موضوع توسط نمودار شکل (۹) به خوبی نمایش داده شده است. حال چنانچه می‌دانیم علاوه بر پارامترهای فوق موضوع مهم دیگر بالای صفر بودن دمای گاز خروجی از توربین انبساطی می‌باشد تا بتواند برای مصارف خانگی یا صنعتی قابل استفاده باشد. با در نظر گرفتن تمامی این پارامترها و بهینه‌سازی انجام

جدول ۵ مقایسه نتایج توان تولیدی از طرح مورد مطالعه با نتایج

Kowala [۱۷] در راندمان $\eta_t = 30\%$

درصد خطا	مدل مورد نظر	Kowala[15]	واحد	T_3
-	-	-۲۸	$^{\circ}\text{C}$	For $q_{1-2}=0.00$
۱۰٪	-۱۸/۷۶	-۱۷	$^{\circ}\text{C}$	For $q_{1-2}=27.40$
۱۷٪	-۸/۲۴	-۷	$^{\circ}\text{C}$	For $q_{1-2}=54.30$
۴۵٪	۲/۱۹۶	۴	$^{\circ}\text{C}$	For $q_{1-2}=80.90$
۱۰٪	۱۲/۶	۱۴	$^{\circ}\text{C}$	For $q_{1-2}=107.4$
۸٪	۲۲/۹۲	۲۵	$^{\circ}\text{C}$	For $q_{1-2}=133.7$
۵٪	۳۳/۲۴	۳۵	$^{\circ}\text{C}$	For $q_{1-2}=160.1$

نتایج عددی اشاره شده در جدول (۵)، به صورت نموداری در شکل (۶) آورده شده است.



شکل ۶ مقایسه نتایج بدست آمده با مقاله مرجع [۱۷] - تاثیر میزان پیش گرمایش بر دمای گاز خروجی از توربین انبساطی

واضح است که دمای گاز خروجی از توربین انبساطی با پیش گرمایش گاز ورودی به آن، افزایش می‌یابد.

۳-۵- بررسی تاثیر میزان پیش گرمایش گاز طبیعی بر روی سه پارامتر اصلی سیستم

برای بررسی این موضوع به علت تشابه نموداری در راندمان‌های مختلف آیزنتروپیک توربین انبساطی تنها دو راندمان ۷۰٪ و ۹۰٪ انتخاب شدند که در زیر به آن‌ها می‌پردازیم.

همانطور که در شکل (۷) و شکل (۸) مشاهده می‌شود با افزایش میزان پیش گرمایش گاز طبیعی توان تولیدی در توربین انبساطی (W) افزایش می‌یابد. همچنین دمای خروجی از توربین انبساطی (T_3) نیز با افزایش همراه است. این در حالی است که نسبت تولید انرژی (ε) با کاهش مواجه می‌شود.

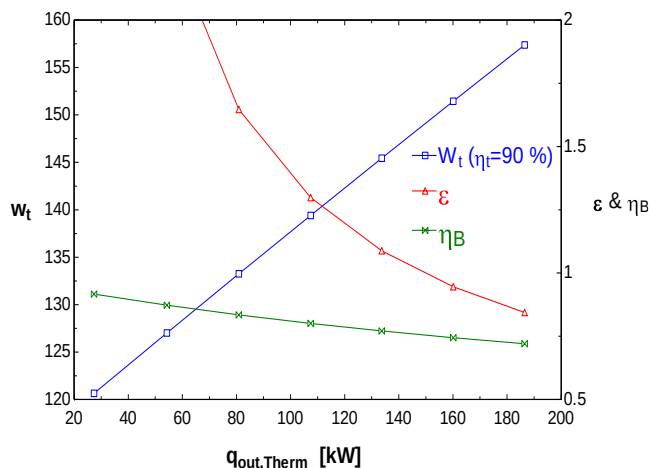
۵- فهرست علائم و اختصارات

دماي گاز بعد از پيش گرمایش	°C	T_2	علائم انگلیسی
انرژی مورد نیاز برای پيش گرمایش گاز طبیعی	kw	q_{1-2}	
میزان کار تولیدی توسط توربین انبساطی	kw	W	
دبی جرمی گاز ورودی	Kg/s	$\dot{m}$	
دماي خروجی از توربین انبساطی	°C	T_3	
نوع گاز استفاده شده در شبیه سازی	(%)	CH_4 (96%)	
فشار ورودی به توربین انبساطی	Mpa	P_2	
فشار خروجی از توربین انبساطی	Mpa	P_3	
			علائم یونانی
نسبت تولید انرژی محلی	-	ϵ	
راندمان آیزنتروپیک توربین انبساطی	-	η_t	

۶- مراجع

- [1] Alshehry, A.S., Belloumi, M., Energy consumption, carbon dioxide emissions and economic growth: the case of Saudi Arabia, *Renew Sustain Energy*, Vol. 41, pp. 237–47, (2015).
- [2] He, W., Wang, Y., Shaheed, M.H., Energy and thermodynamic analysis of power generation using a natural salinity gradient based pressure retarded osmosis process, *Desalination*; Vol. 350, pp. 86–94, (2014).
- [3] Weitemeyer, S., Kleinhans, D., Vogt, T., Agert, C., Integration of renewable energy sources in future power systems: the role of storage, *Renew Energy*, Vol. 75, pp. 14–20, (2015).
- [4] Mathiesen, B.V., Lund, H., Connolly, D., Wenzel, H., Ostergaard PA, Möller B, et al. Smart energy systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions, *Appl Energy*, Vol. 145, pp. 139–54, (2015).
- [5] Quan H, Srinivasan D, Kham badkone AM, Khosravi A. Computational frame work for uncertainty integration in stochastic unit commitment with intermittent renewable energy sources, *Appl Energy*; Vol. 152, pp. 71–82, (2015).
- [6] Howard, C., Oosthuizen, P., Peppley, B., An investigation of the performance of a hybrid turbo expander-fuel cell system for power recovery at natural gas pressure reduction stations, *Appl. Therm. Eng*, Vol. 31, pp. 2165–2170, (2011).
- [7] Lai, T., Guo, Y., Zhao, Q., Wang, Y., Zhang, X., Hou, Y., Numerical and experimental studies on stability of cryogenic turbo-expander with protuberant foil gas bearings, *Cryogenics*, Vol. 96, pp. 62-74, (2018).

شده توسط نرم افزار، حالت ایده آل در راندمان آیزنتروپیک ۹۰٪ برای توربین انبساطی با دمای ورودی $80^{\circ}C$ در ورودی توربین به دست می آید. این حالت با میزان پیش گرمایش $186/5 \text{ kJ/kg}$ قابل حصول است.



شکل ۹ راندمان ۹۰٪ توربین انبساطی

۴- نتیجه گیری

هدف اصلی در مقاله حاضر بهره گیری از توربو اکسپندر به جای رگولاتور فشار (فشار شکن) در ایستگاههای تقلیل فشار گاز شهری می باشد. در این سیستم گاز ورودی به توربو اکسپندر توسط انرژی زمین گرمایی پیش گرم می شود که حرارت لازم توسط یک ترموسیفون بلند با جریان دوفازی بسته به سطح زمین انتقال می یابد. در کار حاضر به مطالعه پارامتریک و بررسی سیستم از دید قانون اول و دوم ترمودینامیک پرداخته شد و نتایج حائز اهمیتی بدست آمدند که از آن میان می توان به موارد مهم ذیل اشاره نمود:

- با افزایش میزان پیش گرمایش گاز طبیعی، توان تولیدی در توربین انبساطی (W) افزایش می یابد. همچنین دمای خروجی از توربین انبساطی (T_3) نیز با افزایش همراه است. این در حالی است که نسبت تولید انرژی (ϵ) با کاهش مواجه می شود؛
- با افزایش میزان پیش گرمایش گاز طبیعی، راندمان قانون دوم و در نتیجه نسبت تبدیل انرژی نیز کاهش می یابد؛
- حالت ایده آل سیستم عبارتست از: راندمان آیزنتروپیک برابر با ۹۰٪ برای توربین انبساطی، دمای $80^{\circ}C$ در ورودی توربو اکسپندر و میزان پیش گرمایش برابر با $186/5 \text{ kJ/kg}$.

- Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp. 1–7, (2008).
- [13] Taleshian Jelodar, M., Rastegar, H., Askarian Abyaneh, H., “Modeling turbo-expander systems”, *Simulation*, Vol. 89, pp. 234-248, (2013).
- [14] Taleshian Jelodar, M., Rastegar, H., Pichan, M., “Voltage improvement using a new control strategy for turbo expander driving systems”, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 64, pp. 1176–1184, (2015).
- [15] Taleshian Jelodar, M., Rastegar, H., Pichan, M., “Turbo expander system behavior improvement using an adaptive fuzzy PID controller”, *AUT J. Model. Simul.* Vol. 49, pp. 23-32, (2017).
- [16] Pozivil, J., Use of expansion turbines in natural gas pressure reduction stations, *Acta Montanistica Slovaca*, Vol. 9, pp. 258-260, (2009).
- [17] Kowala, D., Using the gas pressure potential for electricity generation at Pressure Reduction Stations, *GERG Academic Network Event*, Brussels, (2007).
- [8] Zhou, K., Li, S., Zhao, K., Lin, H., Zhang, Z., Chen, L., Hou, Y., Chen, S., Efficiency control of the cooling-down process of a cryogenic helium turbo-expander for a 2 t/d hydrogen liquefier, *International Journal of Hydrogen Energy*, (2022).
- [9] Konukman, S., Akman, U., Flexibility and operability analysis of a HEN integrated natural gas expander plant, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 60, pp. 7057–7074, (2005).
- [10] Tripathy, S., Jayanarayan, J., Roul, K.M., Energy and exergy analysis for biomass co-coal fuel based thermal power plant, *Int. J. Res. Eng. Technol*, Vol. 3, pp. 54–59, (2015).
- [11] Zehtabian, N., Saffar-Avval, M., Feasibility study of turbo expander installation in city gas station, In: *Proceeding of the 25th international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems*, Perugia, Italy, (2012).
- [12] Daneshi, H., Khorashadi Zadeh, H., Lotfjou Choobari, A., “Turbo expander as a distributed generator”, *Power and Energy Society General*



طراحی صندلی چرخ دار تعاملی و ارگونومیک مجهز به سامانه خدمات بهداشتی

علی فرجی*

استادیار،

گروه طراحی صنعتی،
دانشکده هنرهای زیبا،
دانشگاه تهران، تهران

محمد رضا روفیگر

اصفهانی

دانش آموخته کارشناسی ارشد
طراحی صنعتی، گروه هنر،
واحد علوم و تحقیقات،
دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

چکیده: صندلی چرخ دار تعاملی و ارگونومیک مجهز به سامانه خدمات بهداشتی طراحی شده است. هدف آن علاوه بر رفع نیاز اساسی توان خواه جسمی-حرکتی، که جابجایی است، ارائه نوآورانه هم زمان سامانه خدمات بهداشتی قضای حاجت در یک فضای بهداشتی نیز هست. این پژوهش از نگاه هدف کاربردی و از دیدگاه ماهیت، کیفی-توصیفی است. به صورت میدانی، به دو شیوه کلامی-تصویری (پرسش نامه و مصاحبه) و غیرکلامی (مشاهده)، به روش پیمایشی برای جمع آوری داده ها اقدام نموده و از واکاوی از متخصصین مربوطه (گروه دلفی) بهره برده است. روش طراحی محصول مبتنی بر طراحی نامه بوده که بر پایه طراحی تعامل و کاربر محوری است. صندلی چرخ دار مجهز به سامانه خدمات بهداشتی با ویژگی های تعاملی و ارگونومیک بودن تحت برند صابیتا دستاورد این پژوهش است. کاربر اصلی این محصول که توان خواه جسمی-حرکتی است از یک سو از یک وسیله جابجایی کارآمد، کارا و ایمن بهره می برد و از سویی دیگر هم زمان از سامانه خدمات بهداشتی قضای حاجت در محیطی بهداشتی به همراه شست و شو و تطهیر به عنوان یافته های پژوهش برخوردار می گردد. علاوه بر آن ها، رضایت مندی و خوشنودی کاربر را نیز به دنبال دارد. صندلی چرخ دار صابیتا به منظور ایجاد تعاملی سازنده، نه تنها برای کاربر نقش بسزایی بازی می کند، بلکه باعث سهولت در کار همیاران توان خواه جسمی-حرکتی می شود. از یک سو عناصر شش گانه کاربردپذیری همچون کارآمدی، کارایی، ایمنی/راحتی، مطلوبیت، قابلیت یادگیری و یادآوری آسان را به ارمغان می آورد و از سویی دیگر اهداف طراحی تعامل همچون قابلیت رؤیت، بازخورد، محدودیت ها، سازگاری و فراخوانی را محقق می سازد. در نهایت یک تجربه مطلوب کاربری را به نمایش می گذارد.

واژه های راهنما: صندلی چرخ دار، سامانه خدمات بهداشتی، طراحی تعامل، ارگونومیک، طراحی صنعتی

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۷

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۲

Ali Faraji*
Assistant Professor,
Department of
Industrial Design,
College of Fine Arts,
University of Tehran,
Tehran

**Mohammad Reza
Roofigar Esfehani**
M.A. Industrial
Designer, Department
of Art, Science and
Research Branch,
Islamic Azad
University, Tehran

Design of interactive and ergonomic wheelchair equipped with direct health service system accessibility

Abstract: An interactive and ergonomic wheelchair equipped with a health service system has been designed. Its primary goal is to meet the mobility of the different persons with disabilities. At the same time, its secondary goal is to provide novelty health services such as urination and defecation by observing the tips and health space. This research is applied in terms of purpose and qualitative-descriptive in terms of nature. As a practical matter, it has used two methods of verbal-visual (questionnaire, interview) and non-verbal (observation) by survey method to collect data and benefit from analysis by relevant expert (Delphi) groups. Its design method was the so-called Design up (Tarrahi Nameh in Persian) which was based on the interaction design and user-centered approach and has employed Analytical Hierarchy Process (AHP) to prioritize users. The result is the interactive and ergonomic wheelchair equipped with a health service system under the Sabita brand, which has an effective, efficient and safe means of transportation. It enjoys the sanitary system of defecation in a hygienic environment along with washing and purification, which is the main need of its users and finally seeks their satisfaction and pleasure. The Sabita wheelchair, also, facilitates the work of physically able-bodied assistants. Six elements of usability such as effectiveness, efficiency, safety/comfort, utility, learnability and memorability, on the one hand would be brought. The goals of interaction design as visibility, feedback, constraints, consistency, affordance and engagement user experience, on the other hand, would be illustrated.

Keywords: Wheelchair, Health service system, Ergonomics, Interaction design, Industrial design

۱- مقدمه

موضوع این پژوهش جابجایی افراد توان‌خواه جسمی-حرکتی و مسئله‌ای که بدان می‌پردازد، ارائه خدمات بهداشتی حین جابجایی است [۱]. به عبارت دیگر طراحی صندلی چرخ‌دار^۱ تعاملی و ارگونومیک مجهز به سامانه خدمات بهداشتی برای افراد توان‌خواه جسمی-حرکتی اعم از جانبازان، معلولین و سالمندان ارائه شده است. علاوه بر رفع نیازهای اساسی آن‌ها، از سطح تعاملی همچون کارآمدی^۲ و کارایی^۳ و ارگونومیک همچون راحتی^۴ و ایمنی^۵ عبالا برخوردار خواهد بود.

امروزه میلیون‌ها نفر از مردم جهان به دلایل مختلف دارای معلولیت‌های جسمی-حرکتی هستند و به همین دلیل توانایی آن‌ها برای انجام برخی فعالیت‌ها محدود شده است. بعضی از این افراد با این ناتوانی‌ها به دنیا آمده‌اند و بعضی دیگر به علت افزایش سن و تحلیل عضلات بدن و گروه دیگر به علت حوادث طبیعی و غیرطبیعی دچار این ضعف‌ها و ناتوانی‌ها شده‌اند [۲]. انجام فعالیت‌های روزانه آن‌ها با دیگر افراد متفاوت است. منشأ این تفاوت‌ها استفاده از ابزار و وسایل توان‌بخشی در راستای انجام فعالیت‌ها و کارهای روزانه خود است.

بر اساس گزارش‌های منتشرشده از سازمان بهزیستی کشور در سال ۱۳۹۰، بیش از ۱/۳۵۰/۰۰۰ معلول تحت پوشش بهزیستی قرار گرفته‌اند که از این تعداد چهارده درصد ناشنوا یا کم‌شنوا، ده درصد نابینا یا کم‌بینا، چهل‌ودو درصد معلول جسمی-حرکتی، بیست درصد معلول ذهنی و پنج تا شش درصد هم معلول روانی هستند [همان]. طبق آمار معاونت بهداشت و درمان بنیاد شهید و امور ایتارگران، ۵۸۳/۰۶۴ جانباز در کشور هستند. در این میان ۱۱/۵۱۷ جانباز با قطع اندام تحتانی وجود دارد که هرکدام از آن‌ها دارای سطوح مختلفی از قطع عضو را در بردارند. یکی از وسایل توان‌بخشی که توانسته آنان را در جابجایی یاری کند، صندلی چرخ‌دار است [۳].

فرد توان‌خواه جسمی-حرکتی، به‌طور کوتاه‌مدت و یا بلندمدت، زمان‌های مختلفی را روی این وسیله سپری می‌کند. هنگام استفاده از این وسیله نیازهای گوناگونی دارد که می‌توان نیاز به امنیت، آسایش و راحتی را برشمرد. آن‌ها می‌خواهند که نیازهای عملکردی با زیبایی بصری و فرمی توأم گردد و حس

خوشایندی را ایجاد نماید تا بتوانند در جامعه بدون حس سرخوردگی و خجالت به فعالیت بپردازند [۴].

یکی از نیازهای آنان که به‌طور کلی از نگاه طراحان و سازندگان این وسیله نادیده گرفته شده است، پاسخ به اجابت مزاج (دفع ادرار و مدفوع) با رعایت نکات و فضای بهداشتی هم‌زمان با جابجایی است. برای این افراد جابجایی بسیار مشکل و در مواقعی نیز ناممکن است. زمانی که آن‌ها در منزل و یا بیرون از منزل بر روی صندلی چرخ‌دار قرار دارند، برای استفاده از خدمات بهداشتی نمی‌توانند جابجا شوند و در مواقعی نیز به دلیل بیماری و آسیب‌های گوناگونی که بر سامانه گوارشی و ادراری آن‌ها تأثیر گذاشته، باید این نیاز به سرعت رفع شود و فرصت کافی برای تغییر مکان وجود ندارد [۵].

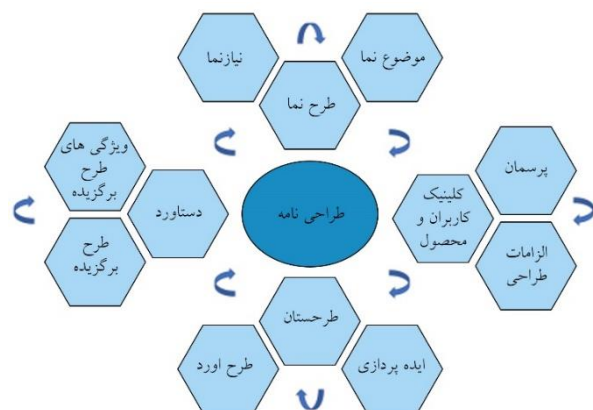
پژوهشی تحت عنوان مدل بیومکانیکی برای تعیین گشتاور اعمالی به مفاصل اندام فوقانی در حرکت رانش ویلچر بیان می‌کند که افرادی که از صندلی چرخ‌دار استفاده می‌کنند در گذر زمان دچار آسیب در نواحی شانه، آرنج و مچ می‌شوند و منشأ این دردها را آسیب به وجود آمده ناشی از رانش صندلی چرخ‌دار می‌داند [۶]. در تحقیقی به بررسی ابعاد آنترپومتری کاربران پاراپلژیک، آسیب‌هایی که بر شانه و نیز گردن کاربران بر اثر رانش صندلی چرخ‌دار به وجود می‌آید، پرداخته است [۷] و با ارائه پیشنهاد و طرح‌هایی برای به حرکت درآوردن صندلی چرخ‌دار سعی در ممانعت از بروز این دسته از مشکلات کرده است [۸]. در پایان‌نامه‌ای با عنوان طراحی ویلچر با استفاده از داده‌های بیولوژیکی با استفاده از سازه‌های الکترومکانیکی و با ارائه شیوه‌های جدید برای معلولین فاقد دست‌وپا، صندلی چرخ‌داری طراحی شده است که حرکت آن بر اساس سامانه پردازش صوت و تصویر است [۹]. پژوهشی به طراحی و توسعه یک ویلچر داخلی خود ران باقابلیت دسترسی مستقیم به توالی پرداخته است. توالی در مکانی ثابت در مکانی داخلی قرار دارد و این ویلچر به توان‌خواه کمک می‌کند که از آن استفاده نماید [۱۰].

مقاله حاضر به دنبال طراحی صندلی چرخ‌داری است که ویژگی آن، تعاملی و ارگونومیک بودن و جنبه نوآوری آن مجهز بودن به سامانه خدمات بهداشتی است. از یک سو ضمن جابجایی کارآمد و ایمن کاربران، اجابت مزاج آنان را تسهیل بخشد و همچنین محیطی بهداشتی همراه با سامانه شست‌وشوی آسان و راحت را فراهم آورد.

⁴ Efficiency⁵ Comfort⁶ Safety¹ Wheelchair² Health service system³ Effectiveness

۲- روش پژوهش و طراحی

این پژوهش از دیدگاه هدف کاربردی و از نقطه نظر ماهیت کیفی-توصیفی است. برای جمع‌آوری داده‌ها از روش پیمایشی^۱ استفاده کرده که مهم‌ترین ابزار آن به صورت میدانی، به دو صورت کلامی-تصویری^۲ (پرسش‌نامه و مصاحبه محقق ساخته) و غیرکلامی^۳ (مشاهده) بوده و از واکاوی از متخصصین مربوطه (گروه دلفی) بهره برده است. با کاربرد طراحی‌نامه^۴ [۱۱] که مبتنی بر روش طراحی تعاملی^۵ کاربر محور^۶ [۱۲] است و به‌کارگیری تحلیل سلسله مراتبی^۷ [۱۳] به منظور ارزیابی در مراحل مختلف پروژه، روش طراحی شکل گرفته است (شکل ۱). طرح نمای محصول که دربردارنده نیازنما و موضوع‌نمای آن است به صورت پژوهش کتابخانه‌ای تحقق می‌یابد. پژوهش میدانی به روش کلینیک کاربران و محصول دنبال شده و در مرحله طرح‌حستان با ایده پردازی محصول و نشان برند آن و از طریق طرح آورد، دستاورد پژوهش رقم خورده است.



شکل ۱ طراحی‌نامه [۱۱]

۲-۲- تعاملی بودن صندلی چرخ‌دار

طراحی تعاملی، به عنوان رویکردی نوین و بین‌رشته‌ای به ارتباط بین کاربر و محصول/خدمت اشاره دارد. این نوع طراحی به دلیل حیطه وسیعی که به خود اختصاص داده با بسیاری از علوم دیگر مرتبط شده است. با مروری بر مطالعات پیشین، کاربرد این رویکرد در حوزه‌های مختلفی از جمله طراحی صنعتی، طراحی مهندسی، طراحی خدمات و همچنین علوم مرتبط با تعامل انسان و رایانه به خوبی مشاهده می‌شود.

این رویکرد در طراحی، لزوماً شامل طراحی صفحه‌نمایش‌های رایانه‌ای نیست، بلکه با تمرکز بر ارتباط دوسویه انسان با محصول/خدمات، همراه با مباحث علمی به هنر

۲-۱- صندلی چرخ‌دار

چرخک یا نشین بر یا صندلی چرخ‌دار وسیله‌ای است که به کمک فردی که توانایی راه رفتن ندارد یا راه رفتن برای او دشوار است، می‌آید تا بتواند جابجایی را سهولت بخشد. این وسیله از دو عضو صندلی و چرخ تشکیل شده است. در سنوات گذشته افراد بیمار و فلج و افرادی که توانایی راه رفتن و حرکت نداشته‌اند، توسط بسترها و کجاوه‌ها حمل می‌شدند و برای تحقق این امر به صورت

⁵ Interaction design

⁶ UCD: User-centered design

⁷ AHP: Analytical Hierarchy Process

⁸ Harry Jennings

¹ Survey

² Verbal-visual

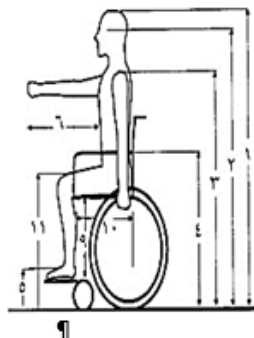
³ Non-verbal

⁴ Design up

کنند. قابل ذکر است که بیشترین هزینه‌ای که برای این افراد صرف می‌شود، هزینه‌های پزشکی و درمانی نیست، بلکه هزینه‌های مراقبت و رسیدگی به آنان و نبود بهره‌وری ناشی از ناتوانی در انجام کار است. تعدیل شرایط محیطی و طراحی وسایل مناسب که به کاهش ناتوانی این افراد بیانجامد، هزینه‌ها را کاهش داده و باعث می‌شود فرد در جامعه حضور فعال داشته باشد. در این بخش ابعاد آنتروپومتری مربوط به کاربران صندلی چرخ‌دار معرفی شده‌اند (جدول ۱) [۷ و ۱۵].

جدول ۱ ابعاد آنتروپومتری مربوط به کاربران صندلی چرخ‌دار [۷ و ۱۵]

ردیف	ابعاد بدن		اندازه (سانتی متر)
	۱۵	کف تا تاج سر	۱۳۱.۴۶
۲۵	۲۵	کف تا چشم	۱۲۰.۱۵
۳۵	۳۵	کف تا شانه	۱۰۵.۶۷
۴۵	۴۵	کف تا رانج	۷۱.۲۵
۵۵	۵۵	کف تا سطح فوقانی پا	۲۳.۸۵
۶۵	۶۵	دسترس به جلو از چشم	۵۸.۱۵
۷۵	۷۵	پهنای شانه	۴۴.۶
۸۵	۸۵	پهنای باسن	۳۶.۳۹
۹۵	۹۵	ارتفاع رگبی	۴۳.۶۴
۱۰۵	۱۰۵	طول رگبی	۴۸.۱۴
۱۱۵	۱۱۵	ارتفاع نشسته	۷۸.۴



۳- پژوهش میدانی: کلینیک کاربران و صندلی چرخ‌دار مجهز به سامانه خدمات بهداشتی

هدف از این پژوهش طراحی وسیله توان بخشی است که از آن به عنوان صندلی چرخ‌دار تعاملی و ارگونومیک مجهز به سامانه خدمات بهداشتی نام برده شده است. این محصول زمانی به بهترین شکل طراحی خواهد شد که گروه هدف و خواسته‌های آن‌ها به طور دقیق و عمیق شناخته شوند و در طراحی لحاظ گردند. کاربران صندلی چرخ‌دار در چهار گروه طبقه‌بندی شده، که شامل توان خواه جسمی-حرکتی، همیاران او، پشتیبان و

کاربردی نیز می‌پردازد. نقش و چالش‌های فرایند طراحی تعامل در طراحی محصولات/خدمات، به عنوان یکی از عوامل اصلی هویت‌دهنده به محیط زندگی، مورد توجه قرار گرفته است. زمانی محصول/خدمت از کیفیت طراحی بالایی برخوردار است که طراح، کاربر و گروه هدف خود را محور و مرکز تحقیقات و مطالعات خود قرار داده و سعی کند از آن‌ها شناختی عمیق و دقیق به دست آورد و تمام نیازهای آن‌ها را شناسایی کرده و درک کند که این شناخت و مطالعه یکی از مهم‌ترین و کارآمدترین مراحل در انجام فرایند طراحی هست.

افرادی که از صندلی چرخ‌دار استفاده می‌کنند، عمدتاً افراد توان خواه جسمی-حرکتی هستند که حرکت و فعالیت آن‌ها در گرو تعامل با وسایل توان بخشی و افراد دیگر است و به همین دلیل در نظر گرفتن رویکرد طراحی تعامل و تجربه کاربری یکی از اصولی است که طراح باید برای این دسته از کاربران بکار گیرد. از یک سو کاربردپذیری که شامل کارآمدی، کارایی، ایمنی، مطلوبیت، قابلیت یادگیری و یادآوری آسان است را محقق می‌سازد و از سویی دیگر اهداف طراحی تعامل همچون رؤیت پذیری ۴، بازخورد ۵ محدودیت‌ها ۶، سازگاری ۷، فراخوانی ۸ و تجربه کاربری ۹ را به ارمغان می‌آورد که دوازده گانه طراحی تعامل نامیده می‌شوند [۱۲].

۲-۳- ارگونومی صندلی چرخ‌دار

برای ایجاد حس خوشنودی در کاربر و همیاران او بایستی به ابعاد، اندازه‌ها و فرم بدن به طور دقیق و عمیق توجه کرد و از آن‌ها در طراحی و ساخت بهره برد. به همین دلیل بر اساس استانداردهای بین‌المللی برای صندلی‌های چرخ‌دار ابعاد و اندازه‌هایی تعیین شده است. تعیین این ابعاد و اندازه‌ها بر اساس ارگونومی، راحتی و آسایش کاربران بوده است [۱۴]. مشخصات آنتروپومتری توان خواه با ناتوانی‌های مختلف، به منظور ایجاد تطابق با محیط کار و زندگی اجتماعی این افراد ضروری است.

استفاده از وسایل و تجهیزاتی که بر اساس ابعاد و ویژگی‌های فیزیکی توان خواه جسمی-حرکتی طراحی شده‌اند، به منظور کاهش هزینه‌های انسانی و سازگاری عملی و قابلیت استفاده از محصولات تولیدی مورد نیاز، لازم است. علاوه بر این بسیاری از افراد مجبورند برای کمک به افراد توان خواه وقت زیادی صرف

⁵ Feedback

⁶ Constraints

⁷ Consistency

⁸ Affordance

¹ Utility

² Learnability

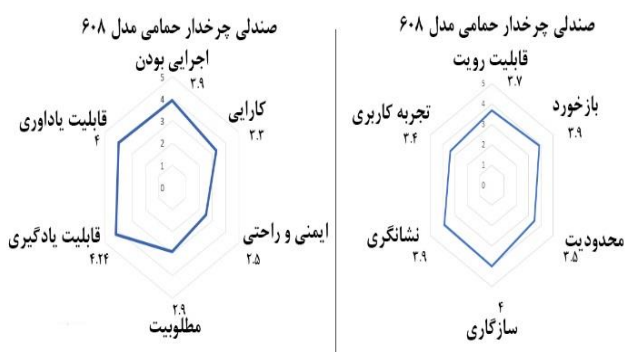
³ Memorability

⁴ Visibility

تحلیل شده و نتایج ارائه گردیده است (شکل ۵) [۱]. قابل ذکر است که روایی (صحت) پرسش‌ها توسط گروه دلفی مورد تأیید قرار گرفته و پایایی (قابلیت اطمینان) نظرسنجی با عدد آلفای کرونباخ ۰/۸۵ به دست آمده است.



شکل ۴ صندلی چرخ دار حمامی مدل ۶۰۸ ساخت شرکت تن آرا [۱۶]



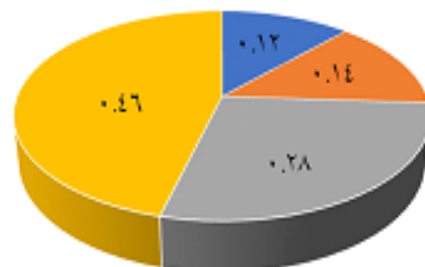
شکل ۵ نتایج تحلیل نظرسنجی کاربران نسبت به ویژگی‌های دوازده گانه تعامل با صندلی چرخ دار حمام و دستشویی تن آرا [۱۶]

مطالعات کتابخانه‌ای مربوط به صندلی چرخ دار و بررسی نمونه محصولات به معیارهای طراحی بالادستی در سه دسته ویژگی همچون عملکردی، ارگونومی و زیبایی‌شناسی منجر گردید [۱]. با استفاده از نتایج حاصل از پرسش‌نامه و مصاحبه/مشاهده تحت عنوان پژوهش میدانی، که روایی (صحت) پرسش‌ها توسط گروه دلفی مورد تأیید قرار گرفته و پایایی (قابلیت اطمینان) نظرسنجی با عدد آلفای کرونباخ ۰/۸۵ به دست آمده، و ترکیب آن‌ها با معیارهای بالادستی، الزامات طراحی صندلی چرخ دار تدوین شده است (شکل ۶ و ۷ و ۸).

کارشناس فروش است (شکل ۲). هرکدام از این کاربران به میزانی با محصول در تعامل هستند. اولویت‌بندی کاربران و میزان تعامل آن‌ها با محصول با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی [۱۳] و در نرم‌افزار اکسل انجام شده است. نظرسنجی برای یافتن اولویت‌بندی کاربران صندلی چرخ دار در بهار ۱۴۰۰ و توسط پانزده نفر از گروه دلفی شامل طراحان صنعتی، مهندسين مکانیک و کارشناسان در حوزه صندلی چرخ دار صورت گرفته که نتایج با نرخ سازگاری ۰/۰۶ به دست آمده است (شکل ۳).



شکل ۲ کاربران صندلی چرخ دار



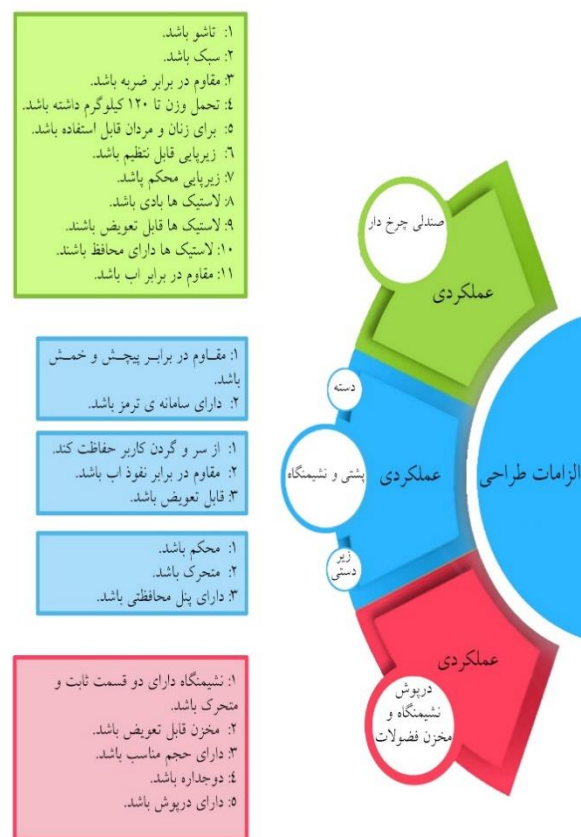
توانخواه جسمی- حرکتی * همیار توانخواه جسمی- حرکتی * کارشناس فروش * پشتیبان

شکل ۳ نتایج نظرسنجی اولویت‌بندی کاربران با نرخ سازگاری ۰/۰۶

برای به دست آوردن معیارهای طراحی، به بررسی صندلی چرخ دار حمامی مدل ۶۰۸ ساخت شرکت تن آرا [۱۶] موجود در بازار از نگاه کاربران پرداخته شده است (شکل ۴). پرسش‌نامه‌ای بالغ بر پنجاه پرسش و دربردارنده دوازده عنصر طراحی تعامل [۱۲] تهیه و تنظیم گردید. در خردادماه ۱۴۰۰ در بین گروه هدف، که عبارت‌اند از هشت نفر جانباز توان‌خواه جسمی- حرکتی، هشت نفر همیار آن‌ها و هشت نفر کارشناس فروش صندلی چرخ دار، به صورت میدانی و مصاحبه‌ای/مشاهده‌ای و با استفاده از نرم‌افزار پرسلاین توزیع و پاسخ آن‌ها دریافت و



شکل ۸ الزامات طراحی از دیدگاه زیبایی شناسی

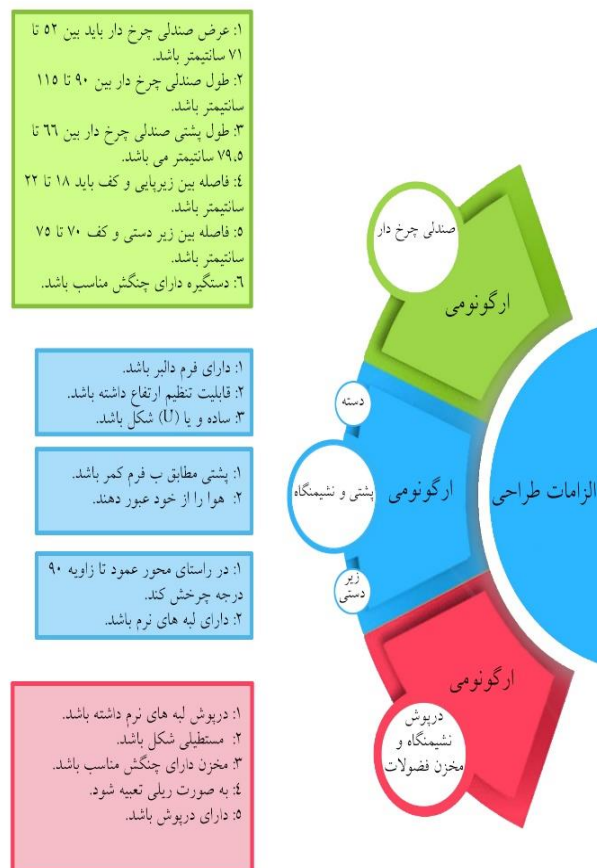


شکل ۶ الزامات طراحی از دیدگاه عملکردی

۴- طرحستان، طرح آورد و دستاورد: صندلی چرخ دار صابیتا

با توجه به الزامات طراحی، طرح های مقدماتی برای صندلی چرخ دار تعاملی و ارگونومیک مجهز به سامانه خدمات بهداشتی تحت عنوان طرحستان ایده پردازی شد و با ارائه سه طرح منتخب تحت برند صابیتا دسته بندی گردید. سامانه خدمات بهداشتی طرح ها متشکل از مخزن فضولات، مخزن آب، دو عدد پمپ آب، محفظه قطعات پلاستیکی و همچنین کلید قطع و وصل پمپ است (شکل ۹). این اجزا و قطعات در زیر محل نشیمن گاه کاربر به صورت ریلی قرار داده شده است و به صفحه اصلی زیرین آن، متصل می شود و توسط مهره ثابت می گردد. زمانی که کاربر قصد استفاده از سامانه را دارد، پس از آماده کردن صندلی چرخ دار برای اجابت مزاج، با فعال کردن کلید شست و شو (برای شست و شوی مقعد یا آلت تناسلی)، پمپ های آب فعال شده و آب را توسط لوله های تعبیه شده به نازل های شست و شو هدایت می کند و عملیات شست و شو انجام می شود.

اجزا، چیدمان و نحوه قرارگیری قسمت های مختلف این سامانه برای هر سه طرح یکسان است. این قسمت ها در همه بخش های طراحی بدون تغییر بوده و برای جلب رضایت کاربر و نحوه برقراری تعامل با آن، مورد پرسش قرار گرفت. همچنین بنا به اصول عملکردی، ارگونومی و زیبایی شناسی، سه طرح صندلی



شکل ۷ الزامات طراحی از دیدگاه ارگونومی



شکل ۱۲ صندلی چرخدار منتخب سه صابیتا



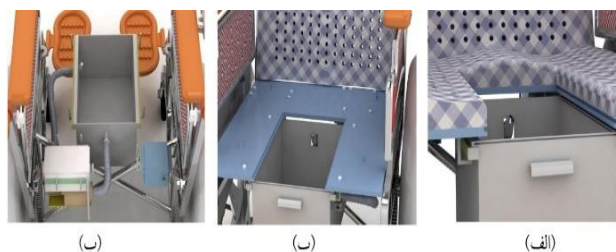
شکل ۱۳ برند صابیتا

بر اساس این نظرسنجی‌ها از بیست و چهار نفر از کاربران و تحلیل آن‌ها [۱]، سامانه خدمات بهداشتی توانسته است با ۹۵ درصد و صندلی چرخدار منتخب یک با ۹۷ درصد بیشترین میزان موافقت کاربران را کسب نمایند. روایی (صحت) پرسش‌ها توسط گروه دلفی مورد تأیید قرار گرفته و پایایی (قابلیت اطمینان) هر دو نظرسنجی با عدد آلفای کرونباخ ۰/۸۵ به دست آمده است (شکل ۱۴ و ۱۵). قابل ذکر است که این دستاورد به صورت نوآورانه و متمایز از تحقیقات و محصولات گذشته بوده و برای اولین بار طراحی گردیده است.



شکل ۱۴ نتایج تحلیل نظرسنجی کاربران نسبت به ویژگی‌های دوازده‌گانه تعامل نسبت به سامانه خدمات بهداشتی با پایایی (قابلیت اطمینان) عدد آلفای کرونباخ ۰/۸۵

چرخدار منتخب مدل‌سازی گردید تا با تدوین پرسش‌نامه و بررسی و تحلیل نتایج حاصل از آن، طرح برگزیده به عنوان دستاورد انتخاب شود (شکل ۱۰ و ۱۱ و ۱۲). در این قسمت دو پرسش‌نامه، هر کدام بالغ بر پنجاه پرسش و دربردارنده دوازده عنصر طراحی تعامل [۱۲] تهیه و تنظیم شده است. یکی از آن‌ها مربوط به سامانه خدمات بهداشتی بوده و دیگر پرسش‌نامه مربوط به صندلی‌های چرخدار مدل‌سازی شده است. این پرسش‌نامه‌ها در مرداد ۱۴۰۰ و از طریق پرسلاین مورد نظرسنجی گروه هدف محصول قرار گرفته است. علاوه نشان برند این محصول تحت نام صابیتا که از خطوط نرم به منظور القای مفاهیم تعامل، قطرات آب برای نمایش وجود سامانه خدمات بهداشتی به منظور شست‌وشو و طهارت و همچنین شمایی از کاربر و صندلی چرخدار استفاده کرده، طراحی شده است (شکل ۱۳).



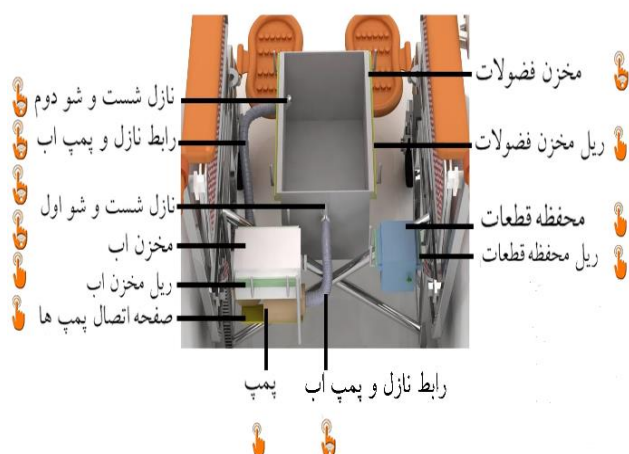
شکل ۹ الف- مخزن فضولات صندلی چرخدار صابیتا، ب- صفحه اصلی نشیمن‌گاه، پ- مجموعه سامانه شست‌وشو



شکل ۱۰ صندلی چرخدار منتخب یک صابیتا



شکل ۱۱ صندلی چرخدار منتخب دو صابیتا



شکل ۱۷ ارتباط نمای چهارگانه سامانه خدمات بهداشتی



شکل ۱۸ ارتباط نمای چهارگانه صندلی چرخدار صابیتا

۴-۲- تعامل نمای صندلی چرخدار صابیتا

صندلی چرخدار صابیتا دارای دوچرخ بزرگ و دوچرخ کوچک بوده که توسط سازه‌ای فلزی به هم متصل شده و مابین چرخ‌ها مکانی برای نشستن کاربر توان‌خواه جسمی-حرکتی فراهم شده است. کاربران این صندلی چرخدار عبارت‌اند از توان‌خواه جسمی-حرکتی، همیار او، پشتیبان و کارشناس فروش که با توجه به اولویت‌بندی آن‌ها، توان‌خواه جسمی-حرکتی و همیار او از بیشترین امتیاز تعامل با محصول برخوردارند. توان‌خواه جسمی-حرکتی برای جابجایی، قضای حاجت در محیطی بهداشتی به همراه شست‌وشو و تطهیر خود با این صندلی چرخدار تعامل برقرار می‌کند و همیار او نیز حسب مورد



شکل ۱۵ نتایج تحلیل نظرسنجی کاربران نسبت به ویژگی‌های دوازده‌گانه تعامل نسبت به صندلی چرخدار منتخب ۱ صابیتا با پایایی (قابلیت اطمینان) عدد آلفای کرونباخ ۰/۸۵

۴-۱- ارتباط نمای صندلی چرخدار صابیتا

چگونگی ارتباط و انتقال اطلاعات ادر استفاده کاربر از صندلی چرخدار صابیتا به چهار طریق نشان داده می‌شود که عبارت‌اند از ارتباط غیرفعال^۲، ارتباط فعال^۳، ارتباط تعاملی^۴ و ارتباط فرافعال^۱ که علائم اینفوگرافیک آن‌ها نشان داده شده است (شکل ۱۶) [۱۱].



شکل ۱۶ علائم اینفوگرافیک ارتباط نما [۱۱]

ارتباط غیرفعال به ارسال اطلاعاتی گفته می‌شود که به صورت یک‌سویه و بدون صرف انرژی از طرف محصول به کاربر انتقال داده می‌شود. اگر ارتباط غیرفعال همراه با صرف انرژی صورت گیرد به آن فعال گویند. در مواردی کاربر برای استفاده از محصول فرمان می‌دهد و توسط محصول فرمان پذیرفته می‌شود، ارتباط دوسویه و تعاملی گفته می‌شود. اگر از طرف کاربر به محصول انتقال اطلاعات صورت پذیرد ارتباط را فرا فعال نامند. ارتباط نمای چهارگانه سامانه خدمات بهداشتی و صندلی چرخدار صابیتا به نمایش گذاشته شده است (شکل ۱۷ و ۱۸).

⁴ Interactive
⁵ Supra-active

¹ Communication view
² Passive
³ Active

برای مواقعی است که کاربر ضمن استفاده از صندلی چرخدار به منظور جابجایی قصد استفاده هم‌زمان از سامانه خدمات بهداشتی آن را نیز داشته باشد (شکل ۲۱).



شکل ۲۰ سناریوی استفاده از صندلی چرخدار صابیتا بدون نیاز کاربر به سامانه خدمات بهداشتی



شکل ۲۱ سناریوی استفاده از صندلی چرخدار صابیتا برای جابجایی و استفاده هم‌زمان از سامانه خدمات بهداشتی

با محصول ارتباط دوسویه دارد. برای تحقق هرچه بهتر این ارتباط، صندلی چرخدار دارای اجزایی است که با طراحی دقیق و مهندسی در کنار هم قرار گرفته و یک سامانه یکپارچه‌ای را تشکیل می‌دهد (شکل ۱۷ و ۱۸). ویژگی‌های فیزیکی، مهندسی و اجزای صندلی چرخدار تعاملی و ارگونومیک مجهز به سامانه خدمات بهداشتی ارائه شده است (شکل ۱۹).



شکل ۱۹ ویژگی‌های فیزیکی، مهندسی و اجزای صندلی چرخدار صابیتا

۴-۳- سناریو نمای صندلی چرخدار صابیتا

با توجه به معرفی قسمت‌ها و اجزای سازنده صندلی چرخدار صابیتا، برای استفاده از محصول و برقراری تعامل با آن دو سناریو در نظر گرفته شده است. سناریوی اول برای زمانی است که هدف کاربر، تنها جابجایی باشد. در این صورت می‌تواند سامانه خدمات بهداشتی را به صندلی چرخدار خود نصب نکند و از آن مانند صندلی چرخدار معمولی استفاده نماید (شکل ۲۰). سناریوی دوم

جدول ۲ ابعاد آنتروپومتری کاربر توان‌خواه جسمی-حرکتی صندلی چرخ‌دار صابیتا

ابعاد بدن	اندازه (سانتی متر)
۱) کف تا تاج سر	۱۳۰
۲) کف تا چشم	۱۲۲
۳) کف تا شانه	۱۱۲
۴) کف تا رانج	۷۷.۵
۵) ارتفاع رگبی	۴۶
۶) کف تا سطح فوقانی پا	۵۷
۷) ارتفاع نشسته	۷۷
۸) دسترسی به جلو از شکم	۵۷
۹) پهنای صندلی	۴۹
۱۰) پهنای نشیمن	۴۹
۱۱) طول رگبی	۵۴



۶- نتیجه‌گیری

با توجه به آمار بالای معلولین و توان‌خواهان جسمی-حرکتی در سطح دنیا و بالخصوص ایران و به‌منظور رفع نیاز این افراد برای جابجایی و استفاده هم‌زمان از خدمات بهداشتی در هر زمان و مکان، برای اولین بار در این پژوهش صندلی چرخ‌دار تعاملی و ارگونومیک مجهز به سامانه خدمات بهداشتی تحت برند صابیتا طراحی گردید. صابیتا از یک‌سو کاربران را در امر جابجایی آسان، راحت و ایمن یاری می‌کند و از سویی دیگر رضایت و خشنودی آنان را با تحقق عناصر دوازده‌گانه کاربردپذیری و تجربه کاربری تأمین می‌نماید.

به‌صورت نوآورانه و متمایز از تحقیقات و محصولات گذشته، دارای سامانه خدمات بهداشتی همراه با صندلی چرخ‌دار و باقابلیت انعطاف‌پذیری در استفاده هم‌زمان با آن است که کاربر را در امر اجابت مزاج و شست‌وشو یاری می‌دهد. این دستاورد به کاربر اعتمادبه‌نفس می‌دهد که بتواند در جامعه حضوری فعال داشته باشد. بدون ترس، اضطراب و سرخوردگی در زمان و مکان‌های مختلف اجابت مزاج خود را به‌تنهایی برآورد. همچنین با ایجاد محیطی بهداشتی به‌منظور شست‌وشو، طهارت و از بین بردن ناپاکی‌ها و نجاسات، توان‌خواه جسمی-حرکتی را از ایجاد بیماری‌های پوستی و عفونت‌ها و بوی بد ناشی از آن در امان نگه‌داشته و کار کارکنان درمان و پرستاران را تسهیل می‌کند.

۵- ویژگی‌های عملکردی، ارگونومی و زیبایی‌شناسی صندلی چرخ‌دار صابیتا

تعاملات کاربران با صندلی چرخ‌دار صابیتا از لحاظ عملکردی، ارگونومی و زیبایی‌شناسی به‌گونه‌ای شکل‌گرفته است که محصول جدید از لحاظ کاربردی با تجربه کاربری آن‌ها سازگار باشد. تنها امکاناتی نوآورانه به آن اضافه شود که بتوانند رضایت آنان را جلب کند و از این جهت یادگیری و یادآوری استفاده از محصول که از نکات مهم تعامل کاربر با محصول است به بیشترین حد خود برسد. همچنین مجموعه اجزای به‌کاررفته قابلیت جداشدن دارند. کاربر هنگام نیاز می‌تواند پشتی، نشیمن‌گاه، زیردستی، زیرپایی و اجزای سامانه خدمات بهداشتی را از صندلی چرخ‌دار جدا کند.

از نظر ارگونومی، زیردستی و زیرپایی این محصول از قابلیت تنظیم ارتفاع برخوردارند. همچنین استفاده از دسته قائم در کنار دسته افقی باعث شده است که همیار توان‌خواه هنگام حرکت در مکان‌های با شیب زیاد کنترل بیشتری بر حرکت صندلی چرخ‌دار داشته باشد. استفاده از پشتی و نشیمن‌گاه ابری بافرم موج و دارای روزنه‌های خالی از دیگر اصول ارگونومی به‌کاررفته در این صندلی چرخ‌دار است.

یکی از نکات مهمی که در بحث طراحی برای افراد توان‌خواه در نظر طراحی است، توجه به ابعاد آنتروپومتری کاربر است. توجه به این ابعاد نه‌تنها باعث ایجاد محصولی باکیفیت و کاربردی شده بلکه هزینه‌های ناشی از بروز مشکلات و آسیب‌ها را به دلیل کاهش آن‌ها در پی دارد. صندلی چرخ‌دار صابیتا کوشیده است تا با در نظر گرفتن ابعاد آنتروپومتری کاربران توان‌خواه جسمی-حرکتی و استفاده‌کنندگان از آن، ضمن جلب رضایت و نیز خشنودی آنان، بالاترین سطح تعامل را با کاربران به نمایش بگذارد (جدول ۲).

از نظر زیبایی‌شناسی، طراحی این محصول به‌گونه‌ای شکل‌گرفته است که با نیازهای روانی کاربران هماهنگ باشد. لذا در این پژوهش برای طراحی اجزا از قبیل مخزن فضولات، مخزن آب و سایر قسمت‌ها و همچنین کلیات صندلی چرخ‌دار از نسبت طلایی استفاده شده است. استفاده از اصل مشابهت گشتالت در استفاده از دایره‌های هم‌اندازه در پشتی، نشیمن‌گاه، زیردستی و زیرپایی و همچنین استفاده از اصل مجاورت در قرارگیری پشتی و نشیمن‌گاه، درپوش نشیمن‌گاه و چیدمان سامانه خدمات بهداشتی در کنار یکدیگر، یکی دیگر از اصول زیبایی‌شناسی به‌کاررفته در این صندلی چرخ‌دار است.

۷- تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت دانشگاه تهران و واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی در انجام این پژوهش قدردانی می‌کنند.

۸- مراجع

- [8] Sadeghi Meh, M., Sharifi, M. R., Investigating different patterns of wheelchair driving and comparing the performance of each according to how different muscles work, *16th Iranian Medical Engineering Conference*, (2009). <https://civilica.com/doc/73458/>. (in Persian فارسی)
- [9] Shiri, A., Wheelchair design using biological signals, *Master thesis, Tabriz University, Tabriz*, (2020). (in Persian فارسی)
- [10] Akhil, J.P., Agith, R. R., Kumar Rangith, S., Design and development of a self-propelled indoor wheelchair with direct toilet accessibility, *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, (2020). <https://doi.org/10.1080/17483107.2020.1839574>.
- [11] Taherian Ojaroud, R., and Faraji, A., Designing jewelry making furniture based on modular, interactive, and ergonomic principles, *Iran J Ergon.*, Vol. 9, No. 3, pp. 19-38, (2021). (in Persian فارسی)
- [12] Sharp, H., Preece, J., Rogers, Y., Interaction design beyond human-computer interaction, 5th Edition, *John Wiley & Sons Inc, New York*, (2019).
- [13] Saaty, T. L., The analytic hierarchy process, *John Wiley & Sons, New York*, (1980).
- [14] Kamenetz, H. L., A brief history of the wheelchair, *Journal of the history of medicine and allied sciences*, Vol. 24, No. 2, pp. 205-210, (1969).
- [15] Moetamedzadeh, M., Hasanbigi, M. R., Choobineh, A. R., Mahjoub, H., Design and construction of ergonomic chairs in accordance with the physical dimensions of Iranian employees, *Journal of Advances in Medical and Biomedical Research*, Vol. 68, No. 17, pp. 45-55, (2009). (in Persian فارسی)
- [16] Tanara Medical and sports industries, <https://tanara.ir/>, (2021). (in Persian فارسی)
- [1] Roofigari Esfehiani, M. R., Interactive wheelchair design equipped with toilet, *Master thesis, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran*, (2021). (in Persian فارسی)
- [2] Monazami Tabar, J., Study of individual and social factors affecting disability in Iranian society, *Iranian Journal of Health Insurance (IJHI)*, Vol. 3, No. 4, pp. 264-275, (2020). (in Persian فارسی)
- [3] Isaar, <https://www.isaar.ir/>, (2021). (in Persian فارسی)
- [4] Kamajli, M., Media and disability, *Journal of Communication Research*, Vol. 49, No. 14, pp. 43-50, (2007).
- [5] Sadeghi, M., Ghsemi, Gh. A., The effect of 12 weeks of rebound therapy exercises on constipation and abdominal pain in patients with spinal cord injury, *Journal of Research in Exercise Rehabilitation*, Vol. 10, No. 5, pp. 41-48, (2017). (in Persian فارسی)
- [6] Javanmardian, A., Dabiri, Y., HaghPanahi, M., Biomechanical model for the determination of torques on upper-extremity joints during wheelchair propulsion, *Iranian Journal of War & Public Health (IJWPH)*, Vol. 1, No. 4, pp. 22-26, (2009). (in Persian فارسی)
- [7] Davudian Talab, A., Tabatabai Ghumshe, F., Osque Zade, R., Azari, Gh., Anthropometric study of paraplegic wheelchair users in Tehran, *Iranian Journal of War & Public Health (IJWPH)*, Vol. 5, No. 3, pp. 22-31, (2013). (in Persian فارسی)



محاسبه ی مدول یانگ سلول سرطانی سر و گردن در طی فرایند نانومنیپولیشن مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی

چکیده: سرطان سر و گردن اغلب دهان، گلو و بینی را درگیر می‌کند. این نوع سرطان با روش های درمانی همچون جراحی، رادیوتراپی و شیمی درمانی سبب آسیب رساندن به سایر سلول ها و عوارضی همچون آسیب های شنوایی و چشایی می‌شود. به منظور رفع این محدودیت در درمان بیماری، مطالعاتی در حوزه ی نانو صورت گرفته است. برخی از این مطالعات در خصوص استفاده از نانوذرات به عنوان حامل های دارویی، شناخت ساختار سلول سرطانی و بررسی خواص مکانیکی صورت گرفته است. در این مطالعه به منظور بهبود درمان و تشخیص زود هنگام این نوع سرطان، به تخمین مدول یانگ سلول سرطانی سر و گردن با استفاده از فرایند نانومنیپولیشن پرداخته شده است. تصاویر توپوگرافی و نمودارهای تجربی مورد استفاده از طریق کاوش سلول سرطانی سر و گردن توسط میکروسکوپ نیروی اتمی استخراج شده است. نوآوری اصلی این پژوهش در استفاده از مدل های تماسی جی کا آر، ام دی و تاتارا بوده است. هدف اصلی پژوهش، رسم نمودارهای عمق نفوذ برحسب نیروی اعمالی، جهت تخمین مدول یانگ بافت سر و گردن است. با مقایسه نتایج تئوری و تجربی، مقدار ۱۲ کیلو پاسکال با در نظر گرفتن مدل تماسی جی کا آر و مقدار ۱۱ کیلو پاسکال با مدل تماسی تاتارا به عنوان مقادیر مدول یانگ سلول سرطانی سر و گردن تخمین زده شده اند.

واژه های راهنما: سرطان سر و گردن، مدل تماسی، مدول یانگ، میکروسکوپ نیروی اتمی، نانومنیپولیشن

معین طاهری *

دانشیار،
گروه مهندسی ساخت و تولید،
دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه اراک، اراک

پیمان کریمی

دانشجوی کارشناسی ارشد

مجید مستعلی

کارشناسی، گروه مهندسی
مکانیک، دانشکده فنی و
مهندسی، دانشگاه اراک، اراک

مصطفی ناظمی زاده

استادیار، مهندسی مکانیک،
مجتمع مکانیک، دانشگاه
صنعتی مالک اشتر، اصفهان

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۴

Moein Taheri*
Associate Professor,
Department of
Manufacturing
Engineering, Faculty of
Engineering, Arak
University, Arak

Peyman Karimi
M.Sc. Student

Majid Mastali
B.Sc., Department of
Mechanical
Engineering, Faculty of
Engineering, Arak
University, Arak

**Mostafa
Nazemizadeh**
Assistant Professor,
Mechanical
Engineering, Faculty of
Engineering, Maleke
Ashtar University,
Isfahan

Calculating the Young's modulus of head and neck cancer cells during the nanomanipulation process using atomic force microscope

Abstract: Head and neck cancer is a disease that often affects the mouth, throat and nose. This type of cancer causes damage to other cells and complications such as hearing and taste damage through treatment methods such as surgery and chemotherapy. Studies have been done on the use of nanoparticles as drug carriers, understanding the structure of cancer cells and investigating their mechanical properties. In this study, in order to improve the treatment and early diagnosis of this type of cancer, the Young's modulus of head and neck cancer cells was estimated using the nanomanipulation process. The topographic images and experimental graphs used were extracted by exploring the head and neck cancer cells under AFM. The main innovation of this research has been in the use of JKR, MD and Tatara contact models. The main aim of the research is to draw indentation depth graphs according to applied force to estimate Young's modulus of Head and Neck tissue. By comparing the theoretical and experimental results of the 12 KPa Young modulus with the JKR model and the value of 11 KPa with the Tatara contact model, the values of the Young modulus of the head and neck cancer cell are estimated.

Keywords: Head and neck cancer, contact model, Young modulus, atomic force microscopy, Nanomanipulation

۱- مقدمه

شکل‌گیری توده‌های گردنی، تغییر صدا، درد سینوس‌ها و ایجاد غدد دهانی از جمله علائم بروز سرطان سر و گردن می‌باشد. درمان این بیماری با توجه به محل تومور، مرحله‌ی سرطان، سن و سلامت عمومی فرد با عوارض قابل توجهی همچون مشکلات در تکلم، بلعیدن و تنفس همراه می‌باشد. شناخت کامل این سلول از لحاظ ساختار و خواص قبل از انتخاب درمان، سبب بهبود روند درمان می‌گردد. این موضوع از مباحث مطرح شده در حوزه‌ی نانو می‌باشد. استفاده از نانوذرات به‌عنوان حامل دارویی، عامل حمله به سلول سرطانی، به‌عنوان ابزاری برای تصویربرداری دقیق‌تر از سلول سرطانی و همچنین تعیین خواص مکانیکی به‌عنوان نشانگر زیستی از جمله کاربردهای فناوری نانو در حوزه‌ی پزشکی می‌باشد. فرایند نانومنیپولیشن، توانایی دست‌کاری در مولکول‌های زیستی و ثبت خواص مکانیکی را در سطح تک‌مولکولی فراهم می‌کند. ابزار میکروسکوپ نیروی اتمی با قابلیت کاوش تمامی سطوح همچون سطوح فلزی، سرامیکی و بیولوژیکی در این فرایند مورد استفاده قرار گرفته است. این ابزار قابلیت اندازه‌گیری خواص مهمی از جمله نیروی چسبندگی، مقاومت الکتریکی و خواص مکانیکی را دارا می‌باشد.

رهروتابان و همکارانش [۱] به بررسی نوع خاصی از سرطان سر و گردن با فرضیاتی در نمونه‌های مورد مطالعه پرداخته‌اند. نمونه‌های مورد آزمایش فرضیاتی همچون درمان فقط به‌وسیله جراحی، بیماری به‌صورت تومور اولیه، عدم سابقه‌ی بیمار با درمان‌های رادیوتراپی و شیمی‌درمانی و اطلاعات کامل بیمار را دارا بوده‌اند. فیستر و همکارانش [۲] به مقایسه‌ی روش ذره‌درمانی با روش سنتی پرتودرمانی پرداخته‌اند. بدین منظور آن‌ها آزمایش‌های لازم را در این خصوص با استفاده از روش ذره‌درمانی شامل پروتون‌ها و یون‌های کربن انجام داده‌اند. آزمایش‌ها در جهت درمان سرطان سر و گردن و کاهش عوارض درمانی صورت گرفته است.

مشرف جوادی و سلیمانی [۳] روش‌های درمانی مبتنی بر نانوذرات را در درمان سرطان مورد مطالعه قرار داده‌اند. علت انتخاب این روش را نیز شباهت نانوذرات به مولکول‌های زیستی بیان کرده‌اند. همچنین راهکاری به‌منظور افزایش مقاومت نانوذرات در برابر سیستم ایمنی بدن ارائه داده‌اند. صالح‌زاده و همکارانش [۴] مروری بر کاربرد نانوذرات معدنی و آلی در تشخیص و درمان سرطان داشته‌اند. در نهایت به کاربردهای این نانوذرات در تشخیص بیماری، حمل دارو و کمک به تصویربرداری مولکولی اشاره کرده‌اند.

پارسا [۵] نقش ژن‌های جهش‌یافته و پروتئین‌ها را در ایجاد سرطان مورد مطالعه قرار داده است. همچنین به اهمیت این اطلاعات در درمان و جلوگیری از پیشرفت سرطان در سایر سلول‌ها اشاره کرده است.

نوروزشمسیان و همکارانش [۶] تراشه‌ی جداساز سلول سرطانی سینه را از گلبول سفید و قرمز طراحی کرده‌اند. اندازه و خواص الکتریکی سلول‌ها از پارامترهای مهم این بررسی بوده‌اند. آن‌ها از ترکیب یک روش فعال و یک روش غیرفعال در این تحقیق استفاده کرده‌اند.

ایوانز و بیسلی [۷] به بررسی رادیوتراپی و شیمی‌درمانی بعد از عمل جراحی سرطان سر و گردن به‌منظور تکمیل فرایند درمان و اطمینان از بهبود کامل بیماری پرداخته‌اند. اندخشیده و همکارانش [۸] رفتار یک میکروتیر تحت بارگذاری الکترواستاتیک را مدل‌سازی کرده‌اند. هدف آن‌ها محاسبه‌ی تغییرات ولتاژ کشیدگی با توجه به توزیع سختی و فاصله‌ی میان تیر و سطح زیرین بوده است.

شیناتو و همکارانش [۹] خوردگی فلز را به‌وسیله‌ی میکروسکوپ نیروی اتمی مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج حاصل با سایر نتایج مورد تحقیق در دیگر آزمایش‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است. عطار و همکارانش [۱۰] به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی در جابه‌جایی خارج از صفحه‌ی میکروتیر پرداخته‌اند. تحلیل‌ها به روش تاگوچی انجام شده‌اند. در نهایت به اهمیت پارامتر طول میکروتیر اشاره شده است.

شارما و همکارانش [۱۱] به بررسی غدد بزاقی به‌وسیله‌ی میکروسکوپ نیروی اتمی و میکروسکوپ الکترونی پرداخته‌اند. آن‌ها از نتایج حاصل از تصویربرداری در تشخیص سرطان بهره برده‌اند. ایشی و همکارانش [۱۲] به توسعه‌ی روش‌های نانومنیپولیشن به‌منظور بررسی خواص مکانیکی مولکول‌های زیستی در سطح تک مولکول پرداخته‌اند.

لی و همکارانش [۱۳] پیشرفت‌های اخیر نانوبات‌ها و همچنین فرایند نانومنیپولیشن را در کاربردهای زیست پزشکی مورد مطالعه قرار داده‌اند. ماشین‌های مولکولی، نانوموتورها، نانوباتیک دی‌ان‌ای و چشم‌اندازهای آینده از جمله مسائل مورد بررسی بوده‌اند. طاهری و بطحایی [۱۴] به آنالیز حساسیت پارامترهای محیطی بر روی نیرو و زمان غلتش به روش آماری ای-فست پرداخته‌اند. انرژی سطحی، کار چسبندگی، مدول الاستیسیته سوزن، مدول الاستیسیته ذره، ضریب پواسون سوزن و ضریب پواسون ذره از جمله پارامترهای ورودی مورد بررسی در طی فرایند نانومنیپولیشن می‌باشند.

کورایم و همکارانش [۱۵] خواص سلول سرطانی سر و گردن را با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی استخراج کرده‌اند.

تهیه‌ی تصاویر توپوگرافی و رسم نمودارهای لازم نیز میکروسکوپ نیروی اتمی بوده است. علاوه بر انجام کار تجربی، یکی از نوآوری‌های اصلی این مقاله استفاده از مدل‌های تماسی جی‌کار، امدی و تاتارا بوده است. یکی از اهداف اصلی نیز در این مقاله رسم نمودارهای عمق نفوذ برحسب نیروی اعمالی، جهت تخمین مدول یانگ بافت سر و گردن با استفاده از مدل‌های تماسی مذکور و مقایسه‌ی نتایج با کارهای گذشته است.

۲- شرح مسئله

در این مقاله به منظور تخمین خاصیت مکانیکی مدول یانگ سلول سرطانی سر و گردن از مدل‌های تماسی جی‌کار، امدی و تاتارا استفاده شده است. به منظور بررسی میزان دقت مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار متلب، از نمونه‌های تجربی نیز استفاده شده است. بدین منظور سلول سرطانی سر و گردن پس از جداسازی و کشت توسط میکروسکوپ نیروی اتمی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل به صورت تصاویر توپوگرافی و نمودار تجربی مدول یانگ ارائه شده است. در نهایت با مقایسه‌ی نتایج تجربی و تئوری، مدل تماسی مطلوب و مقدار تقریبی مدول یانگ بافت سلولی سر و گردن مشخص شده است.

۳- مدل سازی

در این بخش درباره‌ی روند کلی فرایند نانومنیپولیشن و همچنین معادلات تماسی استفاده شده در شبیه‌سازی بحث شده است. مقادیر هندسی و خواص ماده سوزن در جداول ۱ و ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۱ مقادیر هندسی AFM

L(μm)	w(μm)	t(μm)	H(μm)
۲۲۵	۲۴	۱	۱۲

سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی از سیلیکون تک کریستالی تشکیل شده است که خواص مکانیکی آن در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲ خواص مکانیکی AFM

E(GPa)	ν	$\rho (Kg/m^3)$
۱۶۹	۰/۲۷	۲۳۳۰

خواص مورد بررسی شامل ویسکوزیته و مدول الاستیسیته بوده‌اند. استخراج خواص در دو مود تماسی و ضربه‌ای و با استفاده از تئوری‌های تماسی دی‌ام‌تی و هرتز انجام گرفته است. فریدونی و همکارانش [۱۶] به بررسی میزان اثرگذاری هشت پارامتر مختلف شامل شعاع ذره، شعاع سوزن، ارتفاع سوزن، طول تیرک، عرض تیرک، طول ذره، ضریب پواسون و مدول الاستیسیته بر نیرو در فاز دوم نانومنیپولیشن دوبعدی پرداخته‌اند.

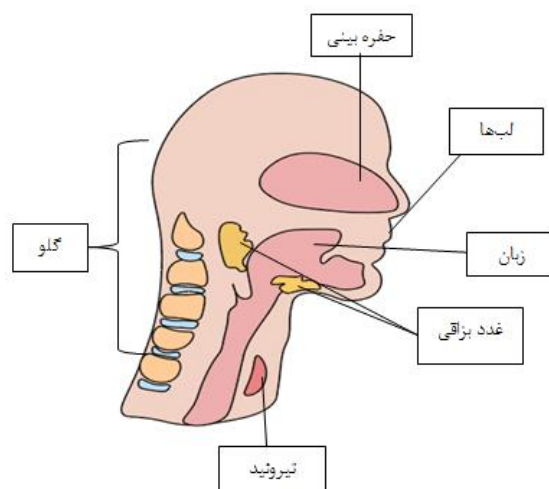
طاهری و میرزالی [۱۷] به بررسی تئوری و تجربی چگونگی استخراج مدول یانگ یافت سرطانی سینه با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی با استفاده از مدل‌های تماسی چان، چنگ و بریک، پرداخته‌اند و با مقایسه‌ی این سه مدل، مدل تماسی چن را یک مدل مطلوب برای این موضوع معرفی نموده‌اند. کورایم و رستگار [۱۸] به توسعه‌ی منیپولیشن سه‌بعدی سلول‌های بیولوژیکی ویسکوالاستیک با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و بر اساس مدل‌های تماسی و کشش نوسانی پرداخته‌اند.

کورایم و همکارانش [۱۹] کاربرد مدل‌های تماس ویسکوالاستیک زبر را در فاز اول منیپولیشن سه‌بعدی برای میکرو/نانوذرات بیولوژیکی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی نموده‌اند. خلیلی و همکارانش [۲۰] به مطالعه‌ی منیپولیشن نانوذره دی‌ان‌ای با بهره‌گیری از میکروسکوپ نیروی اتمی برپایه‌ی روش المان محدود با استفاده از تئوری‌های مکانیک تماس هرتز، جی‌کی‌آر، دی‌ام‌تی و بی‌سی‌پی پرداخته‌اند. کورایم و خاکسار [۲۱] برنامه‌ریزی مسیر بهینه‌ی نانوذرات بیضوی و مکعبی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی یک و دو پروب را مورد مطالعه قرار داده‌اند. طاهری [۲۲] کاربرد میکروسکوپ نیروی اتمی در استخراج نیرو و زمان بحرانی منیپولیشن دوبعدی برای بافت سرطانی معده با مدل‌های اصطکاکی مختلف را بررسی نموده است. طاهری [۲۳] همچنین به بررسی تأثیر مدل‌های اصطکاکی مختلف بر استخراج تجربی نیرو و زمان بحرانی نانومنیپولیشن سه‌بعدی بافت سرطانی روده‌ی بزرگ پرداخته است.

تمرکز این مقاله بر شناخت خواص مکانیکی ریز سلول زیستی سرطان سر و گردن با استفاده از فرایند منیپولیشن است تا فارغ از روش‌های درمان معمول، به کشف روشی با مشکلات و عوارض کمتر کمک کند. مطالعات صورت گرفته با در اختیار قراردادن اطلاعاتی درباره‌ی ساختار و خاصیت مکانیکی مذکور، باعث شناسایی سلول‌های سرطانی و سالم و در نتیجه جلوگیری از تخریب سلول‌های سالم و کارآمدی بیشتر روش‌های درمان خواهد شد. ابزار کاوش موقعیت سلول‌های سرطانی، جهت

۳-۱- فرایند نانومنیپولیشن و کار تجربی

رشد تومورها در ناحیه‌ی سر و گردن به معنای ابتلا به سرطان می‌باشد. ارگان‌های درگیر با این بیماری در شکل (۱) ترسیم شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، سرطان سر و گردن در محل‌هایی همچون سینوس‌ها، دهان، گلو، حنجره و غدد بزاقی رخ می‌دهد. از جمله علل بروز این بیماری مواردی همچون مصرف الکل و دخانیات، ویروس اچ‌پی‌وی، اشعه‌ی ماورای بنفش و جنسیت می‌باشد.



شکل ۱ ارگان‌های درگیر با سرطان سر و گردن

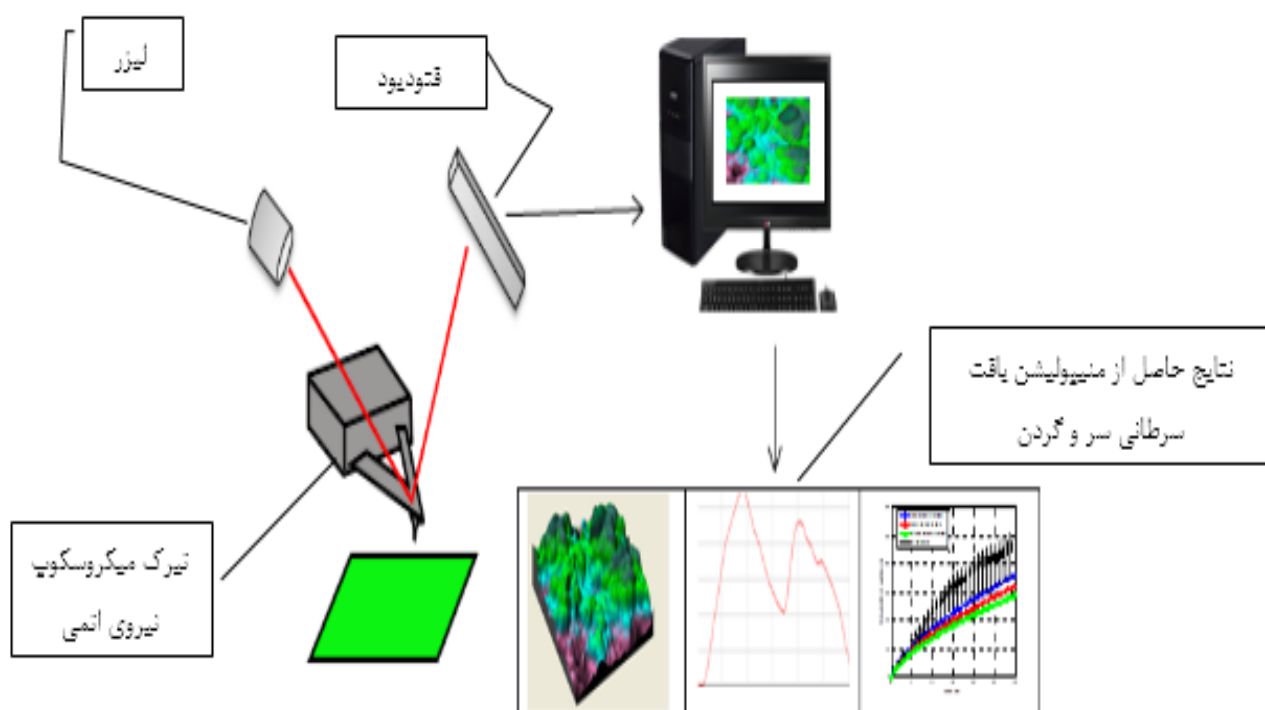
نانومنیپولیشن از جمله روش‌های شناخت سلول‌های بیولوژیکی همچون سلول‌های سرطانی می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، این فرایند به کمک ابزار مهمی به نام میکروسکوپ نیروی اتمی انجام می‌شود.

با نزدیک شدن نوک سوزن به نمونه و با توجه به نیروهای اتمی بین سوزن و سطح بستر، تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی دچار انحراف می‌شود. روش تشخیص این انحراف به کمک تاباندن نور لیزر و بازتاب در یک آشکارساز حساس به موقعیت مانند فتودیود می‌باشد.

میکروسکوپ نیروی اتمی با اندازه‌گیری دقیق و غیرمخرب انحراف تیرک و نیروی اعمالی، به ترسیم نمودارهای نیرو-عمق نفوذ پرداخته و به کمک معادلات تماسی به استخراج خواصی همچون نیروهای چسبندگی، ویسکوزیته، هندسه و مدول یانگ می‌پردازد.

۳-۲- مدل‌های تماسی

یکی از مهم‌ترین مسائل در هنگام استفاده از معادلات در ابعاد نانو توجه به تماس بین سطوح مختلف می‌باشد. در فرایند نانومنیپولیشن تماس در سطح صورت می‌گیرد و معادلات در دو بخش تماس بین ذره-سوزن و ذره-صفحه‌ی بستر مورد بررسی قرار می‌گیرند.



شکل ۲ فرایند استخراج خواص توسط میکروسکوپ نیروی اتمی

۳-۲-۱- مدل تماسی جی کاآر

با رفع محدودیت تئوری تماسی هرتز و در نظر گرفتن نیروهای چسبندگی به عنوان پارامتری مهم در تماس ذرات در ابعاد نانو و به خصوص برای ذرات بیولوژیکی، مدل تماسی جی کاآر [۲۴] به وجود آمده است. برای معادلات تماسی ذره و سوزن در مدل تماسی جی کاآر داریم:

همان طور که مشاهده می شود، معادلات مربوط به نیروی چسبندگی، شعاع تماس و عمق نفوذ به ترتیب در معادلات (۱) تا (۳) آورده شده اند.

$$F_{(adh)JKR} = (6\pi\omega^* K a_{JKR}^3)^{1/2} \quad (1)$$

$$a_{JKR} = \left[\left(\frac{R_p \times R_t}{R_p + R_t} \right) K \times \left(P_z \cos \phi + P_y \sin \phi + 3\pi \frac{R_p \times R_t}{R_p + R_t} \omega^* + \left[6\pi \frac{R_p \times R_t}{R_p + R_t} \omega^* (P_z \cos \phi + P_y \sin \phi) + \left(3\pi \frac{R_p \times R_t}{R_p + R_t} \omega^* \right)^2 \right]^{1/2} \right) \right]^{1/3} \quad (2)$$

$$\delta_{JKR} = \frac{a_{JKR}^2 (R_p + R_t)}{R_p \times R_t} - \sqrt{\frac{8\pi\omega^* a_{JKR}}{3K}} \quad (3)$$

برای تماس ذره-صفحه می بنا داریم:

معادله (۴) نمایانگر نیروی تماسی ذره-صفحه، معادله (۵) شعاع تماسی و معادله (۶) رابطه عمق نفوذ در محل تماس می باشند.

$$F_{(adh)JKR} = (6\pi\omega^* K a_{JKR}^3)^{1/2} \quad (4)$$

$$a_{JKR} = \left[\frac{R_p}{K} [P_z + 3\pi R_p \omega^* + [6\pi R_p \omega^* P_z + (3\pi R_p \omega^*)^2]^{1/2}] \right]^{1/3} \quad (5)$$

$$\delta_{JKR} = \frac{a_{JKR}^2}{R_p} - \sqrt{\frac{8\pi\omega^* a_{JKR}}{3K}} \quad (6)$$

در معادلات ۱ تا ۶، $F_{(adh)JKR}$ نیروی چسبندگی در مدل تماسی جی کاآر، ω^* انرژی سطح، K مدول الاستیسیته مؤثر، a_{JKR} شعاع تماسی مدل جی کاآر، R_p شعاع ذره، R_t شعاع سوزن، P_z نیرو در راستای محور قائم، P_y نیرو در راستای محور افقی و δ_{JKR} عمق نفوذ در این مدل را نشان می دهند.

۳-۲-۲- مدل تماسی ام دی

مدل تماسی ام دی [۲۵] با حل مشکلات تئوری های تماسی دی ام تی و جی کاآر مطرح شده است. این تئوری شامل حل تحلیلی بوده است. در ادامه به طرح معادلات این تئوری پرداخته شده است. نیروی چسبندگی اعمالی در مدل تماسی ام دی و در ناحیه تماس بین ذره و سوزن در رابطه (۷)، شعاع تماس در رابطه (۸) و عمق نفوذ در رابطه (۹) آورده شده اند.

$$F_{(adh)MD} = \lambda a_{MD}^2 \left(\frac{\pi(R_p + R_t)\omega^* K^2}{R_p \times R_t} \right)^{1/3} \times [\sqrt{m^2 - 1} + m^2 \arctan \sqrt{m^2 - 1}] \quad (7)$$

$$1 = \left[\frac{\lambda a_{MD}^2}{2} \left(\frac{(R_p + R_t)^2 K}{\pi(R_p \times R_t)^2 \omega^*} \right)^{2/3} \times [\sqrt{m^2 - 1} + (m^2 - 2) \arctan \sqrt{m^2 - 1}] \right] + \left[\frac{4\lambda^2 a_{MD}^2}{3} \left(\frac{(R_p + R_t)^2 K}{\pi(R_p \times R_t)^2 \omega^*} \right)^{1/3} \times [1 - m + \sqrt{m^2 - 1} \arctan \sqrt{m^2 - 1}] \right] \quad (8)$$

$$\delta_{MD} = \frac{(R_p + R_t)a_{MD}^2}{(R_p \times R_t)} - \frac{4\lambda a_{MD}}{3} \left(\frac{\pi(R_p + R_t)\omega^*}{(R_p \times R_t)K} \right)^{1/3} \sqrt{m^2 - 1} \quad (9)$$

نیروی چسبندگی، شعاع تماسی و عمق نفوذ در معادلات تئوری تماسی ام دی در محل تماس ذره با صفحه بستر در روابط (۱۰) تا (۱۲) اشاره شده است.

$$F_{(adh)MD} = \lambda a_{MD}^2 \left(\frac{\pi\omega^* K^2}{R_p} \right)^{1/3} \times [\sqrt{m^2 - 1} + m^2 \arctan \sqrt{m^2 - 1}] \quad (10)$$

$$1 = \left[\frac{\lambda a_{MD}^2}{2} \left(\frac{K}{\pi R_p^2 \omega^*} \right)^{2/3} \times [\sqrt{m^2 - 1} + (m^2 - 2) \arctan \sqrt{m^2 - 1}] \right] + \left[\frac{4\lambda^2 a_{MD}^2}{3} \left(\frac{K}{\pi R_p^2 \omega^*} \right)^{1/3} \times [1 - m + \sqrt{m^2 - 1} \arctan \sqrt{m^2 - 1}] \right] \quad (11)$$

$$\delta_{MD} = \frac{a_{MD}^2}{R_p} - \frac{4\lambda a_{MD}}{3} \left(\frac{\pi\omega^*}{R_p K} \right)^{1/3} \sqrt{m^2 - 1} \quad (12)$$

در معادلات ۷ تا ۱۲، $F_{(adh)MD}$ نیروی چسبندگی در مدل تماسی ام دی، ω^* انرژی سطح، K مدول الاستیسیته مؤثر، m نسبت شعاعی، a_{MD} شعاع تماسی مدل ام دی، R_p شعاع ذره، R_t شعاع سوزن، λ نسبت گسترش و δ_{MD} عمق نفوذ در مدل ام دی را نشان می دهند.

۳-۲-۳- مدل تماسی تاتارا

تئوری تاتارا [۲۶] مربوط به اجسام های پیرالاستیک و با بهینه سازی مدل تماسی هرتز ارائه شده است. رابطه ی (۱۵) با توسعه ی معادلات (۱۳) و (۱۴) استخراج می گردد. این رابطه به منظور ایجاد ارتباط بین نیرو و تغییر شکل اصلی هرتز ایجاد شده است.

$$\delta_H = \left[\frac{F}{a} \right]^{2/3} - \frac{F}{a_c} \quad (13)$$

$$\frac{1}{a_c} = \frac{(1+\nu_1)(3-2\nu_1)}{4\pi E_1 R_1} + \frac{(1+\nu_2)(3-2\nu_2)}{4\pi E_2 R_2} \quad (14)$$

$$F = a\delta_H^{3/2} + \left(\frac{3a^2}{2a_c} \right) \delta_H^2 + \left(\frac{15a^3}{8a_c^2} \right) \delta_H^{5/2} \quad (15)$$

در معادلات ۱۳ تا ۱۵، F نیرو در مدل تماسی تاتارا، a شعاع تماسی، ν_1 نسبت پواسون ذره، ν_2 نسبت پواسون سوزن، E_1 مدول الاستیسیته ی ذره، E_2 مدول الاستیسیته ی سوزن، a شعاع تماسی مدل تاتارا، R_1 شعاع ذره، R_2 شعاع سوزن و δ_H عمق نفوذ در مدل تاتارا را نشان می دهند.

۴- تفسیر و تحلیل نتایج

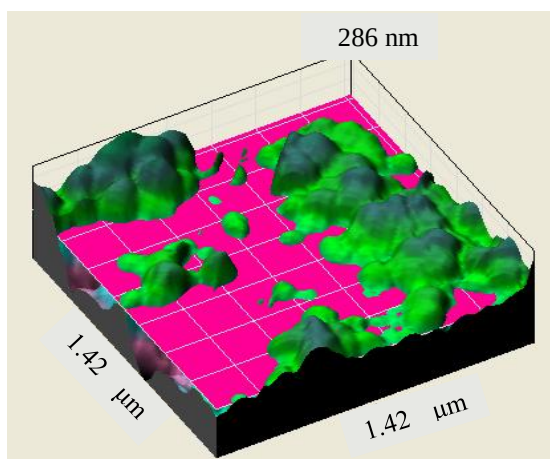
در این بخش نتایج حاصل از تصویربرداری میکروسکوپ نیروی اتمی و نمودارهای تجربی و شبیه سازی های تئوری مورد تحلیل قرار گرفته اند.

۴-۱- استخراج تصاویر توپوگرافی در منیپولیشن سه بعدی بافت سرطانی سر و گردن توسط میکروسکوپ نیروی اتمی

تصاویر توپوگرافی ثبت شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی در شکل (۳) آورده شده است. این تصاویر به صورت دوبعدی و سه بعدی قابل ترسیم می باشند. در تنظیمات نرم افزار مورد استفاده، با در نظر گرفتن رنگ های متفاوت برای بازه های مختلف ارتفاع، تصاویری سه بعدی با در نظر گرفتن مکان دقیق سلول نشان داده شده است. به منظور تعیین هندسه ی سلول و استفاده از آن در معادلات حاکم بر تئوری های تماسی و معادلات نانومنیپولیشن، محدوده هایی برای تعیین میانگین ارتفاع تعیین شده است. شکل (۴) نمایش دهنده ی میانگین ارتفاع سلول مورد

بررسی در دو بعد می باشد. در نهایت هندسه ی سلول سر و گردن مورد آزمایش به صورت کره در نظر گرفته شده است.

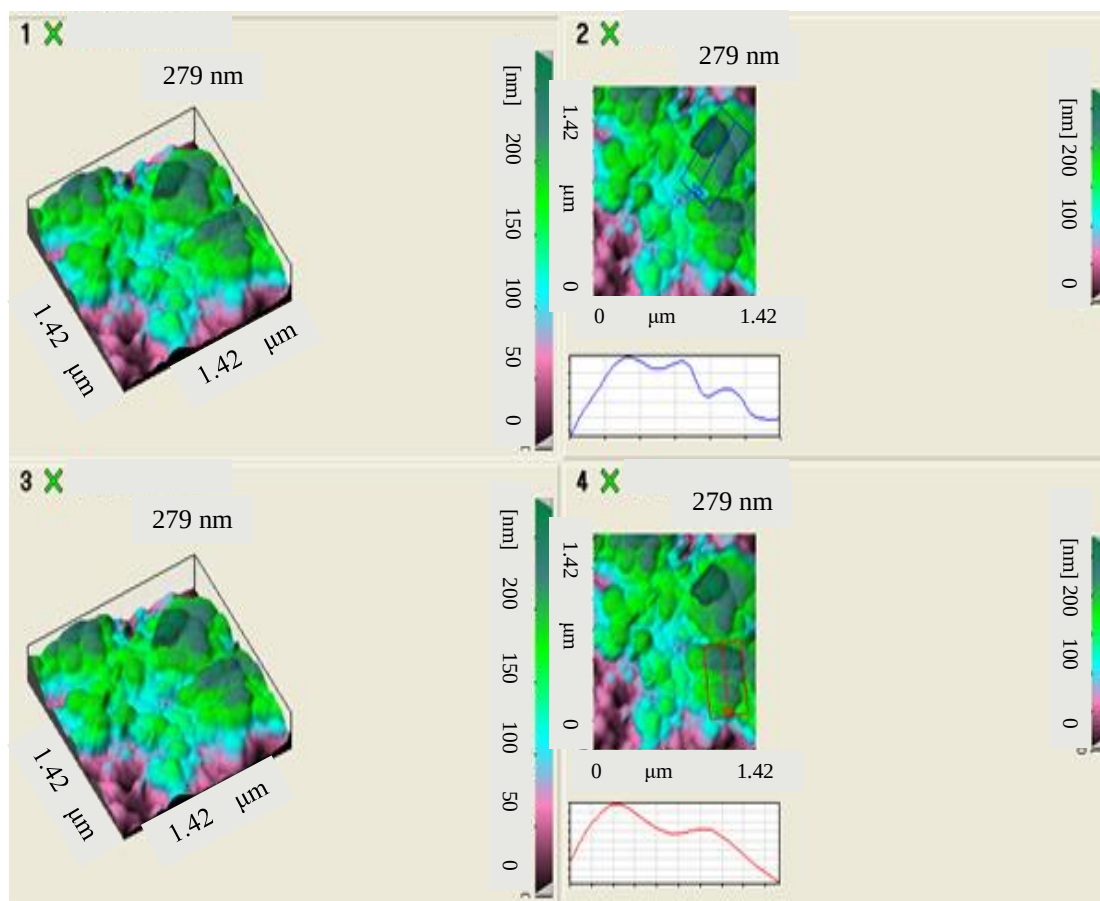
از دیگر نتایج حاصل از کاوش سطح توسط میکروسکوپ نیروی اتمی، می توان به نمودار نیرو-عمق نفوذ در شکل (۵) اشاره نمود. این نمودار با در نظر گرفتن نیروی بارگذاری مطلوب نسبت به عمق نفوذ، مانع از آسیب به بافت سلولی می گردد. به منظور ترسیم دقیق تر این نمودار هر نقطه نمایشگر مقدار میانگین چندین آزمایش تجربی می باشد.



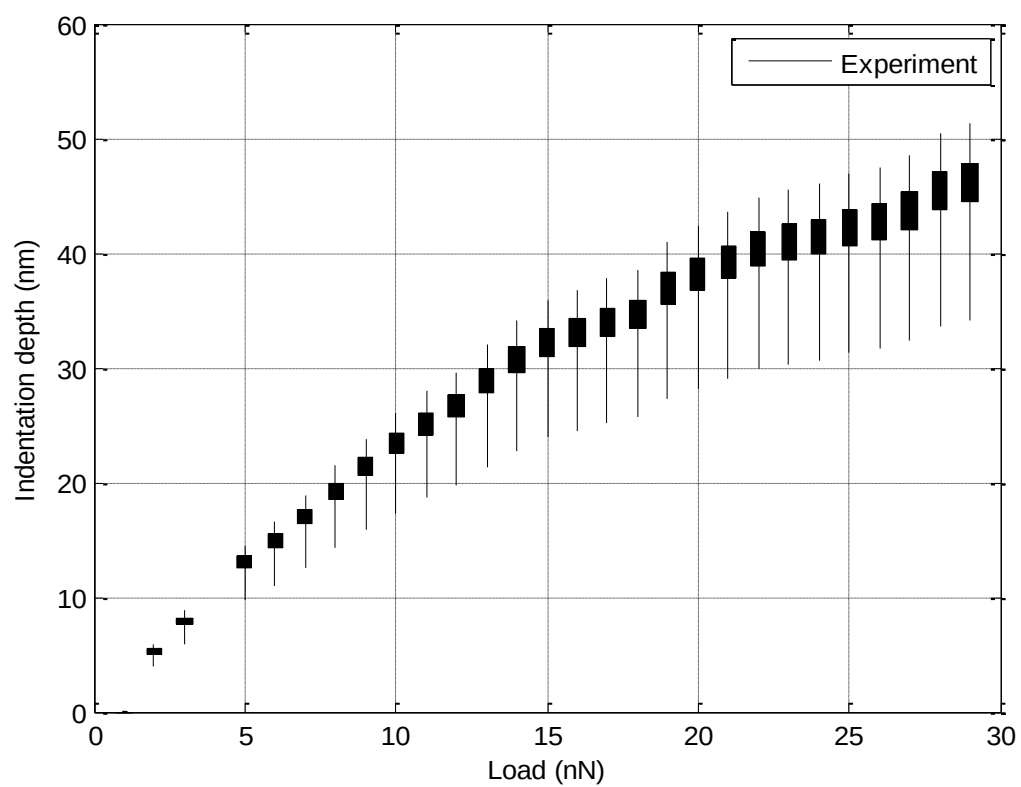
شکل ۳ توپوگرافی ثبت شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی

۴-۲- نتایج حاصل از شبیه سازی

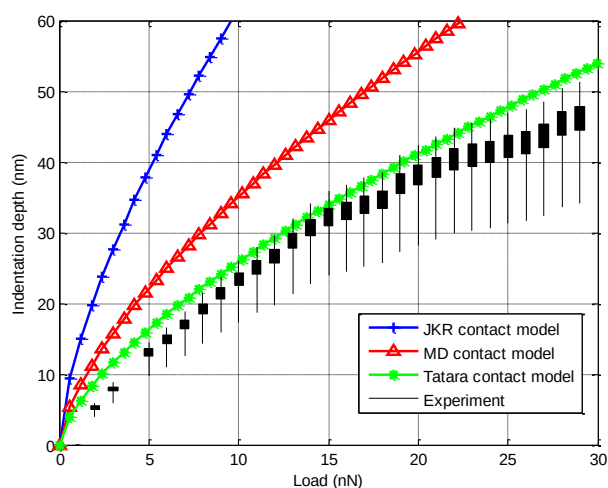
همان طور که در بخش مدل سازی اشاره شد، استخراج مدول یانگ بافت های سلولی در مطالعه و بهبود روش های درمان مؤثر می باشد. از دیگر نتایج استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی در کاوش سلول ها، استخراج مدول یانگ می باشد که در شکل (۶)، به منظور تعیین بازه ی مدول یانگ برای شبیه سازی، نتایج به صورت نمودارهای تجربی و تئوری با در نظر گرفتن مدول های تماسی جی کآر، امدی و تاتارا ترسیم شده اند. با توجه به این نمودارها مدول یانگ سلول سرطانی سر و گردن با در نظر گرفتن این مدول های تماسی در بازه ی ۹ تا ۱۵ کیلو پاسکال قرار گرفته است. با در نظر گرفتن مدول یانگ ۱۳ کیلو پاسکال در شبیه سازی های صورت گرفته، نمودار تجربی با مدل تماسی جی کآر در شکل (۷-الف) تطابق بیشتری داشته است. با کاهش مقدار مدول یانگ به ۱۱ کیلو پاسکال نمودار تجربی به سمت نمودار حاصل از شبیه سازی تئوری با مدل تماسی تاتارا سوق پیدا کرده است. نمودار امدی نیز بین نمودارهای جی کآر و تاتارا قرار گرفته مقدار مدول یانگ را حدود ۱۲ کیلو پاسکال تخمین می زند.



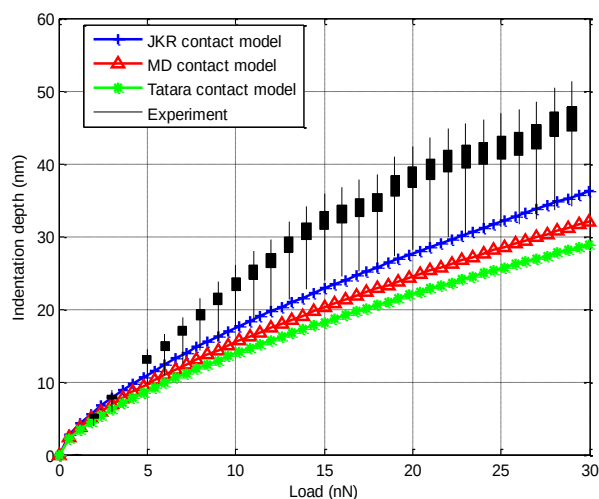
شکل ۴ میانگین ارتفاع سلول



شکل ۵ نیرو-عمق نفوذ سلول سرطانی

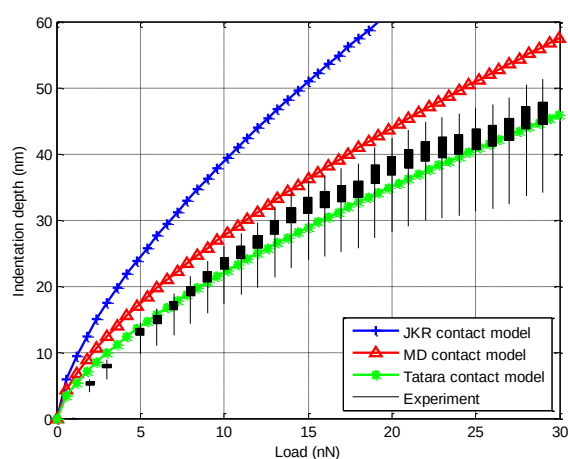


شکل ۶ ب- مدول یانگ ۹ کیلو پاسکال

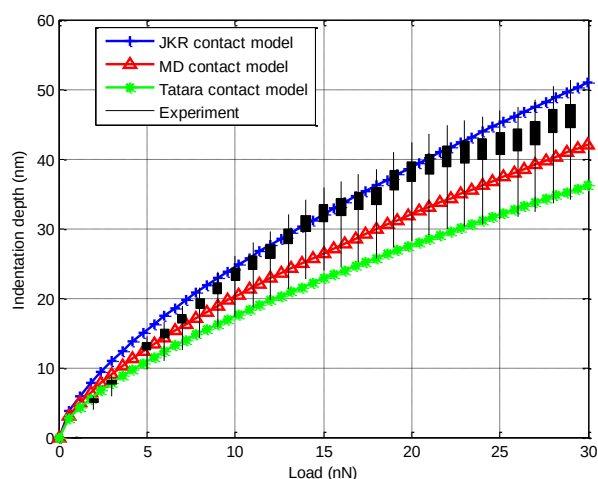


شکل ۶ الف- مدول یانگ ۱۵ کیلو پاسکال

شکل ۶ تعیین بازه‌ی مدول یانگ

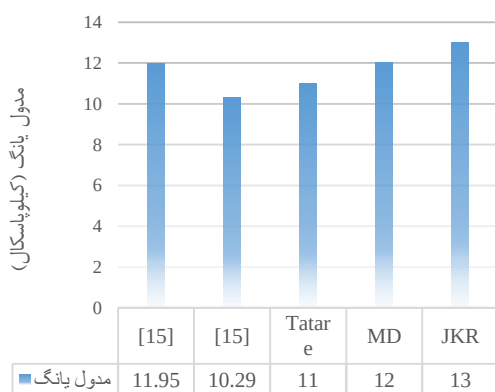


شکل ۷ ب- مدول یانگ ۱۱ کیلو پاسکال



شکل ۷ الف- مدول یانگ ۱۳ کیلو پاسکال

شکل ۷ تخمین مدول یانگ بافت سلولی سر و گردن



شکل ۸ نمودارهای صحت‌سنجی

۵- صحت‌سنجی

به‌منظور بررسی صحت نتایج به‌دست آمده، در این بخش مقایسه‌ی نتایج این مقاله با نتایج مرجع [۱۵] آورده شده است. تفاوت در مقادیر مرجع [۱۵] با توجه به تفاوت در مدل‌های تماسی استفاده شده در این دو تحقیق می‌باشد. مدل‌های تماسی دی‌ام‌تی و هرتز در این مرجع استفاده شده است.

۶- نتیجه گیری

نانومنیپولیشن با کاربردهایی همچون آماده سازی سیستم های بیولوژیکی، تغییر خواص نانوذرات و ساخت تجهیزات ریزمقیاس از جمله فرایندهای نوین به شمار می آید. بهره گیری از این فرایند با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی می تواند در مطالعات ذرات بیولوژیکی در تمامی محیطها مورد توجه واقع گردد. سلول های سرطانی از جمله مسائل مورد توجه در حوزه ی پزشکی می باشند. درمان مطلوب در این حوزه بدون شناخت ساختار و خواص مکانیکی سلول سالم و سرطانی، سبب تخریب سایر سلول ها و ناکارآمدی درمان می گردد. سرطان سر و گردن با شیوع بالا در میان مردان نسبت به زنان از جمله بیماری های مهم می باشد. در این تحقیق به منظور بررسی مقدار مدول یانگ به عنوان خواص مکانیکی سلول سر و گردن، از میکروسکوپ نیروی اتمی استفاده شده است. پس از مشخص شدن هندسه ی سلول با استفاده از آنالیز تصاویر توپوگرافی و مشخص کردن مدل های تماسی، نمودارهای تئوری ترسیم شده اند. مدل های تماسی جی کآر، امدی و تاتارا از جمله تئوری های مورد بررسی در این تحقیق می باشد. نمودار تجربی نیز با در نظر گرفتن تمامی شرایط و کاوش سطح ترسیم شده است. در نهایت با در نظر گرفتن تطابق بین نتایج تئوری و نمودار تجربی، مقادیر ۱۳ کیلو پاسکال با مدل تماسی جی کآر، ۱۲ کیلو پاسکال با مدل تماسی امدی و ۱۱ کیلو پاسکال با مدل تماسی تاتارا به عنوان مقادیر مدول یانگ سلول سرطانی سر و گردن تخمین زده شده اند. به طور کلی با توجه به صحت سنجی صورت پذیرفته و مقایسه ی نتایج این پژوهش با کارهای گذشته، می توان گفت مدل تاتارا با توجه به در نظر گرفتن اجسام هایپراالاستیک نسبت به مدل های جی کآر و امدی از دقت بالاتری برخوردار می باشد. در پژوهش های آینده و به منظور دستیابی به نتایج مطلوب تر می توان سایر پارامترهای فرایند مانند هندسه ی تیرک میکروسکوپ نیروی اتمی، محیط های مختلف و سختی تیرک را مورد بررسی قرار داد. همچنین می توان سایر مدل های تماسی را نیز در این تخمین مورد ارزیابی قرار داد.

۷- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

a_{JKR}	شعاع تماسی مدل جی کآر (nM)
a_{MD}	شعاع تماسی مدل جی کآر (nM)
E_1	مدول الاستیسیته ی ذره (KPa)
E_2	مدول الاستیسیته ی سوزن (KPa)

علائم یونانی

F	نیروی مدل تاتارا (nN)
$F_{(adh)JKR}$	نیروی چسبندگی در مدل جی کآر (nN)
$F_{(adh)MD}$	نیروی چسبندگی در مدل امدی (nN)
K	مدول الاستیسیته ی مؤثر (KPa)
P_Y	نیروی خارجی در راستای محور قائم (nN)
P_Z	نیروی خارجی در راستای محور افقی (nN)
R_p	شعاع ذره (nM)
R_t	شعاع سوزن (nM)
m	نسبت شعاعی
ω^*	انرژی سطح ($nN/\mu M$)
δ_H	عمق نفوذ مدل تماسی تاتارا (nM)
δ_{JKR}	عمق نفوذ مدل تماسی جی کآر (nM)
δ_{MD}	عمق نفوذ مدل تماسی امدی (nM)
λ	نسبت گسترش
ν_1	نسبت پواسون ذره
ν_2	نسبت پواسون سوزن

۸- مراجع

- [1] Rahrotaban, S., Jolehar, M., Khatibi, A., Tissue Eosinophilia in Head and Neck Squamous Cell Carcinoma, *J Res Dent Sci.*, Vol. 11, No 2, pp. 96-102, (2012).
- [2] Pfster, D.G., Spencer, S., Brizel, D.M., Burtneess, B., Busse, P.M., Caudell, J.J., Cmelak, A.J., Colevas, A.D., Dunphy, F., Eisele, Head and neck cancers, version 1.2015: featured updates to the NCCN guidelines, *Journal of the National Comprehensive Cancer Network: JNCCN*, Vol. 13, No. 7, pp. 847-856, (2015).
- [3] Moshref javadi, M., Soleimani, N., Therapeutic and anticancer effects of nanoparticles, *RJMS*, Vol. 27, No. 10, pp. 115-134, (2020).
- [4] Salehzadeh, M., Norouzian, P., Abbasalipourkabir, R., The use of nanoparticles in diagnosis and treatment of breast cancer: A review, *Pajouhan Scientific Journal*, Vol. 13, No. 2, pp. 1-12, (2015).
- [5] Parsa, N., Molecular and cellular basis of human cancer, *Journal of cell & tissue*, Vol. 2, No. 4, pp. 365-376, (2012).
- [6] Noruzshamsian, O., Mohseni, A., Mojaddam, M., Design of a micro-separator for Circulating Tumor Cells (CTCs) from blood flow using hybrid pinched flow fractionation (PFF) and dielectrophoresis methods, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 10, No. 1, pp. 281-296, (2020).
- [7] Evans, M., Beasley, M., Target delineation for postoperative treatment of head and neck cancer, *Oral oncology*, Vol. 86, pp. 288-295, (2018).

- [18] Korayem, M. H., Rastegar, Z., Development of 3D manipulation of viscoelastic biological cells by AFM based on contact models and oscillatory drag, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 28, No. 24, pp. 2572-2584, (2021).
- [19] Korayem, M. H., Mozafari, M., Sooha, Y. H., Rastegar, Z., Development and application of rough viscoelastic contact models in the first phase of 3D manipulation for biological micro-/nanoparticles by AFM, *Archive of Applied Mechanics*, Vol. 91, No. 9, pp. 3739-3753, (2021).
- [20] Khalili, M., Taheri, M., Bathaee, S. H., Shakeri, F., Study of DNA nanoparticle manipulation using atomic force microscopy based on finite element method using theories of contact mechanics, *Mechanics of Advanced and Smart Materials*, Vol. 1, No. 2, pp. 155-174, (2022).
- [21] Korayem, M. H., Khaksar, H., Optimum path planning of elliptic and cubic nanoparticles using one and dual probe atomic force microscopes, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 29, No. 15, pp. 2126-2141, (2022).
- [22] Taheri, M., Application of atomic force microscopy in critical force and critical time extraction of 2D manipulation for gastric cancer tissue with different friction models, *Nanoscale*, Vol. 9, No. 1, pp. 136-145, (2022).
- [23] Taheri, M., Investigation of the effect of different friction models on experimental extraction of 3D nanomanipulation force and critical time of colon cancer tissue, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 54, No. 4, pp. 4-4, (2022).
- [24] Johnson, K.L., Kendall, K., Roberts, A., Surface energy and the contact of elastic solids, *Proceedings of the royal society of London, A. mathematical and physical sciences*, Vol. 324, No. 1558, pp. 301-313, (1971).
- [25] Sun, Y., Akhremitchev, B., Walker, G.C., Using the adhesive interaction between atomic force microscopy tips and polymer surfaces to measure the elastic modulus of compliant samples, *Langmuir*, Vol. 20, No. 14, pp. 5837-5845, (2004).
- [26] Tatara, Y., On compression of rubber elastic sphere over a large range of displacements—part 1: theoretical study, *ASME, J. Eng. Mater. Technol.*, pp. 285-291, (1991).
- [8] Andakhshideh, A., Maleki, S., Marashi, S.S., Investigation of nonlinear pull-in phenomena in functionally graded micro-beams under electrostatic excitation, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 8, No. 3, pp. 137-151, (2018).
- [9] Shinato, K.W., Huang, F., Jin, Y., Principle and application of atomic force microscopy (AFM) for nanoscale investigation of metal corrosion, *Corrosion Reviews*, Vol. 38, No. 5, pp. 423-432, (2020).
- [10] Attar, A., Tahmasebipour, M., Dehghan, M., Investigation of the effect of geometrical parameters on the out-of-plane displacement of a T-shaped piezoelectric microcantilever, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 8, No. 4, pp. 1-9, (2018).
- [11] Sharma, S., Rasool, H.I., Palanisamy, V., Mathisen, V., Schmidt, M., Wong, D.T., Gimzewski, J.K., Structural-mechanical characterization of nanoparticle exosomes in human saliva, using correlative AFM, FESEM, and force spectroscopy, *ACS nano*, Vol. 4, No. 4, pp. 1921-1926, (2010).
- [12] Ishii, Y., Ishijima, A., Yanagida, T., Single molecule nanomanipulation of biomolecules, *TRENDS in Biotechnology*, Vol. 19, No. 6, pp. 211-216, (2001).
- [13] Li, M., Xi, N., Wang, Y., Liu, L., Progress in nanorobotics for advancing biomedicine, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 38, No. 1, pp. 130-147, (2020).
- [14] Taheri, M., Bathaee, S.H., Sensitivity analysis of peripheral parameters in three dimensional nano-manipulation by using HK model, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 9, No. 2, pp. 123-139, (2019).
- [15] Korayem, M. H., Heidary, M., Rastegar, Z., The head and neck cancer (HN-5) cell line properties extraction by AFM, *Journal of biological engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 1-15, (2020).
- [16] Fereiduni, F., Taheri, M., Modabberifar, M., Investigation of the effect of different parameters on force in the second phase of two-dimensional nanomanipulation, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 23-31, (2021).
- [17] Taheri, M., Mirzalou, M., Theoretical and experimental simulation of young modulus extraction of breast MCF-10 cells using atomic force microscope, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp. 37-45, (2021).



طراحی کنترل گام به عقب انتگرالی هوشمند و طراحی مسیر بهینه برای کوادروتور با استفاده از الگوریتم ازدحام افزایشی ذرات

چکیده: در این مقاله یک کنترل کننده گام به عقب انتگرالی برای کنترل موقعیت سیستم کوادروتور ارائه شده که با استفاده از الگوریتم هوشمند بهینه سازی ازدحام افزایشی ذرات، جهت بهینه سازی پارامترهای کنترل طراحی شده مورد بررسی قرار گرفته است که در نهایت پارامترهای طراحی به منظور حصول پاسخ مطلوب بهینه بر روی کنترل کننده منظور شده اند. در ادامه به طراحی مسیر بهینه برای پرند کوادروتور به کمک روش الگوریتمی تکاملی ازدحام ذرات و با در نظر گرفتن موانع از پیش تعیین شده در محیط سه بعدی پرداخته شده است، که امنیت پرواز کوادروتور را در محیط های سه بعدی از پیش شناخته شده تأمین می کند، همچنین با در نظر گرفتن موانع محیطی، کوتاه ترین مسیر بین مبدأ و مقصد به عنوان مسیر مطلوب کوادروتور مشخص می شود. در این مقاله علاوه بر بهینه سازی ضرایب کنترلر گام به عقب انتگرالی در جهت کاهش تلاش کنترلی ربات، به بهینه سازی مسیر حرکت کوادروتور پرداخته شده که هدف از این بهینه سازی، کاهش مصرف انرژی در حرکت ربات از مبدأ به مقصد می باشد که در نهایت مسیر تولید شده توسط الگوریتم به عنوان مسیر مطلوب پرند به کنترل کننده گام به عقب انتگرالی بهینه شده داده شده و نتایج در محیط متلب شبیه سازی شده است.

واژه های راهنما: کوادروتور، کنترل گام به عقب انتگرالی بهینه، تولید مسیر بهینه، الگوریتم ازدحام ذرات

وحید تیکانی

دانشجوی دکتری

حامد شهبازی*

استادیار

پیمان نوروزی

دانشجوی دکتری،

گروه مهندسی مکانیک،

دانشکده فنی و مهندسی،

دانشگاه اصفهان، اصفهان

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۹

Vahid Tikani
Ph.D. Candidate

Hamed Shahbazi*
Assistant Professor

Peyman Norouzi
Ph.D. Candidate,
Department of
Mechanical
Engineering, Faculty of
Engineering, University
of Isfahan, Isfahan

Design intelligent integral Back-step controller and path planning for Quadrotor by Swarm optimization algorithm

Abstract: In this paper, an intelligent integral Back-step controller is used to control the position of the quadrotor. Using a new strong particle swarm optimization algorithm, the optimal system response is Achieved by changing constant design values in the controller. Then, the optimal path for the quadrotor is designed using the algorithmic method of particle swarm and considering the predetermined obstacles in the three-dimensional environment, which ensures safety flight. Also, the shortest path between the origin and destination as the optimal path is determined. Finally, the path generated by the algorithm as the optimal path of planning. Thus, in addition to optimizing the control parameters in the controller, the quadrotor path is also optimized using the algorithm to minimize energy consumption from source to destination. Finally, by simulating the system in MATLAB environment, the system response to the desired input in a limited time was plotted and investigated.

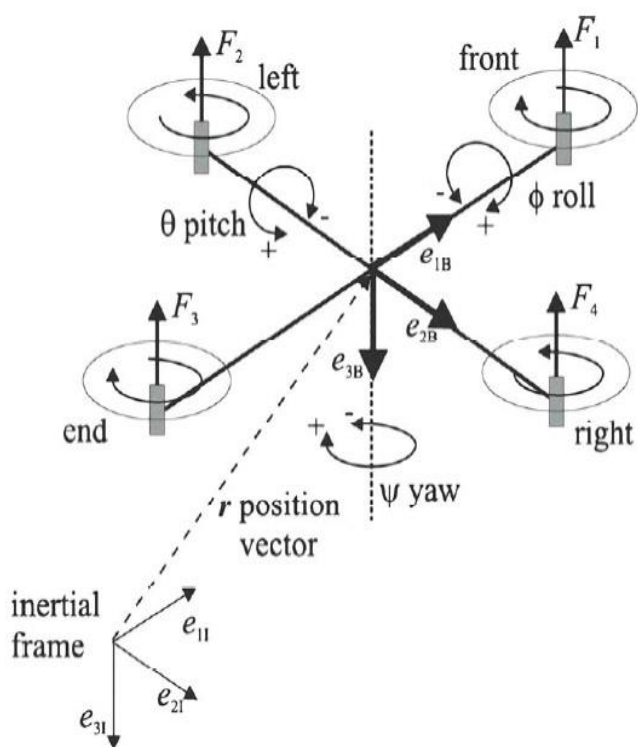
Keywords: Quadrotor, Integral back-step controller, Path-planing, Particle swarm optimization algorithm

۱- مقدمه

تعقیب مسیر در پرند کوادروتور از آن جهت مورد اهمیت است که برای تعریف عملیات برای ربات نیاز به کنترل ربات برای عبور در راستای مسیر مطلوب بدون برخورد با موانع می باشد. تولید مسیر به روش کمترین خطای برخورد از جمله روش پیاده شده برای تولید مسیر بهینه می باشد [۲۵]، همچنین تولید مسیر با استفاده از برنامه نویسی دودویی از روش های دیگر ارائه شده برای تولید مسیر برای ربات در فضای سه بعدی می باشد [۲۶].

در این مقاله شبیه سازی کنترل کننده گام به عقب انتگرالی برای کوادروتور و بهینه سازی پارامترهای کنترلی با استفاده از الگوریتم ازدحام افزایشی ذرات مورد توجه قرار گرفته است. در قسمت دوم این مقاله مدل ریاضی کوادروتور بررسی شده و در قسمت سوم طراحی کنترل کننده گام به عقب انتگرالی بیان شده است. در ادامه با توجه به توانایی الگوریتم های تکاملی در بهینه سازی سیستم ها، از الگوریتم ازدحام ذرات به عنوان الگوریتم تکاملی استفاده شده که به محاسبه ضرایب کنترلی با استفاده از این الگوریتم پرداخته شده است. در قسمت چهارم پیاده سازی و بررسی نتایج کنترل کننده برای عبور از مسیر مطلوب در فضای شبیه سازی متلب صورت گرفته است.

۲- مدل سازی ریاضی کوادروتور



شکل ۱ پیکربندی کوادروتور

با توجه به کاربرد فراوان پهپادها در دهه های اخیر برای کاربردهای نظامی و غیرنظامی از جمله: آتش نشانی، عملیات جستجو، نقشه برداری و... موجب شده این پرنده ها بسیار مورد توجه محققان قرار بگیرد. طراحی پرنده های چندملخه مانند کوادروتور از آغاز قرن بیستم مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. اولین پرنده چهارملخه در سال ۱۹۲۱ توسط دو بوسزات^۱ ساخته شد [۱]. از آن پس پرنده های چهارملخه متعددی از جمله هلیکوپتر برگوت^۲ و یا هلیکوپتر امنیچ^۳ ساخته شد [۲ و ۳]. با توجه به اینکه در آن دوره ساخت و توسعه سنسورها و طراحی سیستم کنترلی چندان امکان پذیر نبود، طراحی پرنده های خودکار عملاً غیرممکن بود. پیشرفت های اخیر در حوزه کنترل و الکترونیک که منجر به ساخت سنسورهای با دقت بالا شده است، این امکان را برای طراحان به وجود آورده که به طراحی پهپادهای کنترل پذیر روی آورند. از این رو پهپادها در اندازه های مختلف و با امکانات گسترده ساخت و توسعه یافته اند [۴-۷].

تحقیق و توسعه در مدل سازی و طراحی کنترل کننده برای پهپاد کوادروتور در دهه های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. تعدادی از این پژوهش ها به صورت خلاصه در ادامه آمده است. التوگ و همکارانش کوادروتوری بر اساس روش اولر- نیوتون برای تمرکز بر پایدار سازی و کنترل سیستم با استفاده از تصاویر مدل سازی کرد [۸]. ساتر و همکارانش نیز به بررسی طراحی کنترل کننده با استفاده از سرو کنترلرهای مبتنی بر پردازش تصویر پرداخته اند [۹]. دانفید و همکارانش یک کنترل کننده مبنی بر شبکه عصبی برای کوادروتور طراحی نمود [۱۰]. ارل و همکارانش برای تخمین موقعیت کوادروتور از یک فیلتر کالمن استفاده نمود [۱۱]. لی و همکارانش نیز به طراحی کنترل کننده مود لغزشی برای کوادروتور پرداخته اند [۱۲]. بورا و همکارانش یک کنترل کننده فازی هیبریدی برای کنترل کوادروتور ارائه کردند [۱۳]. اشتا و همکارانش در [۱۴] به مقایسه کنترل کننده PID و فازی پرداخته است. طراحی کنترل کننده فازی برای سیستم های دینامیکی بسیار مورد استفاده قرار گرفته که از جمله آن می توان به طراحی کنترل کننده فازی-منطقی برای کوادروتور اشاره داشت [۲۲-۱۵]. در مقالات اخیر محققان اقدام به طراحی کنترل کننده فازی برای کنترل ارتفاع و پایدار سازی آن در وضعیت ایستا نموده اند [۲۴ و ۲۳]. تولید و

³ Oemnichen¹ Debothezat² Berguet

$$X=[\phi \dot{\phi} \theta \dot{\theta} \psi \dot{\psi} z \dot{z} x \dot{x} y \dot{y}] \quad (7)$$

$$x_1=\phi \quad x_7=z$$

$$x_1=\dot{x}_1=\dot{\phi} \quad x_8=\dot{x}_7=\dot{z}$$

$$x_3=\theta \quad x_9=x$$

$$x_4=\dot{x}_3=\dot{\theta} \quad x_{10}=\dot{x}_9=\dot{x} \quad (8)$$

$$x_5=\psi \quad x_{11}=y$$

$$x_6=\dot{x}_5=\dot{\psi} \quad x_{12}=\dot{x}_{11}=\dot{y}$$

$$U=[U_1 \ U_2 \ U_3 \ U_4]^T \quad (9)$$

که ورودی‌های کنترلی به صورت معادلات (۱۰) تا (۱۳) می‌باشند:

$$U_1=\sum_{i=1}^4 T_i=b(\Omega_1^2+\Omega_2^2+\Omega_3^2+\Omega_4^2) \quad (10)$$

$$U_2=(-T_2+T_4)=b(-\Omega_2^2+\Omega_4^2) \quad (11)$$

$$U_3=(T_1+T_3)=b(\Omega_1^2-\Omega_3^2) \quad (12)$$

$$U_4==d(-\Omega_1^2+\Omega_2^2-\Omega_3^2+\Omega_4^2) \quad (13)$$

در معادلات بالا b ضریب رانشی و d ضریب درگ است. تابع انتقال بین نرخ تغییرات سرعت‌های زاویه‌ای $(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$ و سرعت‌های خطی (p, q, r) می‌تواند به صورت یک ماتریس واحد منظور شود، بنابراین در صورتی که انحراف از حالت پرواز ایستا کم باشد می‌توان نوشت:

$$(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}) \approx (p, q, r) \quad (14)$$

که با ساده‌سازی معادلات (۱) تا (۶) داریم:

$$f(X, U) = \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta}\psi a_1 - \dot{\theta} a_2 \Omega_r + b_1 U_2 \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi}\psi a_3 - \dot{\phi} a_4 \Omega_r + b_2 U_3 \\ \dot{\psi} \\ \dot{\theta}\phi a_5 + b_3 U_4 \\ \dot{z} \\ g - (\cos\phi \cos\theta) \frac{1}{m} U_1 \\ \dot{x} \\ u_x \frac{1}{m} U_1 \\ \dot{y} \\ u_y \frac{1}{m} U_1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

ساختار کوادروتور متشکل از دو بال عمود برهم می‌باشد و هر کدام دارای موتورهایی در انتهای خود هستند. دو موتور مقابل با شماره ۱ و ۳ در راستای ساعت گرد می‌چرخند و موتورهای مقابل با شماره ۲ و ۴ در راستای پادساعت گرد می‌چرخند. هر کدام از این موتورها یک نیروی تراست در جهت عمودی رو به بالا و یک گشتاور در جهت مثبت دوران ایجاد می‌کند. نیروی تراست تولیدشده در هر موتور برای انجام حرکت چرخشی حول محور Z استفاده می‌شود. الگوریتم‌های کنترلی طراحی شده سعی دارند تا با تنظیم سرعت هر روتور بتوانند مانورهای مختلف را انجام دهند و سیستم را به سمت ورودی مطلوب هدایت کنند. پیکربندی کوادروتور در شکل ۱ نشان داده شده است.

به منظور طراحی الگوریتم‌های کنترلی نیاز به داشتن مدل دینامیکی سیستم می‌باشد که در اینجا مدل دینامیکی سیستم به صورت $\dot{X}=f(X, U)$ منظور می‌شود که U بردار ورودی کنترلی سیستم و X بردار متغیرهای حالت سیستم است و به صورت (۱) تا (۶) تعریف می‌شوند [۲۷]:

$$\ddot{x} = (\cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi) \frac{U_1}{m} \quad (1)$$

$$\ddot{y} = (\cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi) \frac{U_1}{m} \quad (2)$$

$$\ddot{z} = -g + (\cos(\phi)\cos(\theta)) \frac{U_1}{m} \quad (3)$$

$$\ddot{\phi} = \dot{\theta}\psi \left[\frac{I_{yy}-I_{zz}}{I_{xx}} \right] + \frac{J_r}{I_{xx}} \dot{\theta}\Omega_d + \frac{1}{I_{xx}} U_2 \quad (4)$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\phi}\psi \left[\frac{I_{zz}-I_{xx}}{I_{yy}} \right] - \frac{J_r}{I_{yy}} \dot{\phi}\Omega_d + \frac{1}{I_{yy}} U_3 \quad (5)$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\theta}\dot{\phi} \left[\frac{I_{xx}-I_{yy}}{I_{zz}} \right] + \frac{1}{I_{yy}} U_4 \quad (6)$$

که در آن X و Y و Z موقعیت مرکز جرم در سازه و ϕ و θ و ψ زوایای اوایلر هستند. همچنین m و I_x و I_y و I_z جرم و ممان اینرسی سیستم حول محور مختصات سیستم می‌باشد. L فاصله بین روتورها و مرکز جرم سیستم است و J_r و Ω_R ممان اینرسی و سرعت زاویه‌ای تیغه‌های پرواز هستند. U_1 و U_2 و U_3 و U_4 ورودی‌های کنترلی سیستم و به ترتیب نیروی تراست مجموع و مومنتم تولیدشده چرخشی حول محور Y ، مومنتم چرخشی حول محور X و مومنتم چرخشی حول محور Z توسط تیغه‌های پروازی می‌باشند. مدل (۱) برای نوشتن معادلات به فرم $\dot{X}=f(X, U)$ با ورودی X به عنوان متغیر حالت و U به عنوان بردار ورودی کنترلی به صورت معادلات (۷) تا (۹) نوشته می‌شود:

ضرایب عبارت ۱۵ به صورت معادلات (۱۶) تا (۲۵) می باشند:

$$a_1 = \frac{I_y - I_z}{I_x} \quad (16)$$

$$a_2 = -\frac{I_R}{I_x} \quad (17)$$

$$a_3 = \frac{I_z - I_x}{I_y} \quad (18)$$

$$a_4 = \frac{I_R}{I_y} \quad (19)$$

$$a_5 = \frac{I_x - I_y}{I_z} \quad (20)$$

$$b_1 = \frac{l}{I_x} \quad (21)$$

$$b_2 = \frac{l}{I_y} \quad (22)$$

$$b_3 = \frac{l}{I_z} \quad (23)$$

$$U_x = (\cos x_1 \sin x_3 \cos x_5 + \sin x_1 \sin x_5) \quad (24)$$

$$U_y = (\cos x_1 \sin x_3 \sin x_5 - \sin x_1 \cos x_5) \quad (25)$$

در این الگوریتم بهینه سازی ابتدا پروسه بهینه سازی را برای اولین گام زمان ($k=k_0$) شرح می دهیم تا مقدار بهینه W^{k_0} را به دست آوریم. پروسه بهینه سازی ترکیبی پارامترهای سیستم کنترلی، یک پروسه تکراری است که از یک مجموعه Q تایی مقادیر اولیه تصادفی شروع به کار می کند و پارامترهای بهینه فضای حالت را جستجو می کند. هر مقدار اولیه داخل یک بردار M تایی ($Pos(j)$) قرار می گیرد که بردار پارامتر W را مقداردهی می کند. این بردار Pos در طول اجرای الگوریتم مرتباً بروز رسانی می شود. در حلقه اصلی الگوریتم، تکرار تا زمانی که خطای برآورد زیاد است و یا تعداد مشخصی تکرار به پایان نرسیده است ادامه می یابد. در هر دور هر بردار $Pos(j)$ با بردار جدید $Pos(j)+V(j)$ جایگزین می شود که در اینجا $V(j)$ بردار سرعت کلی $Pos(j)$ می باشد. بردار سرعت کلی $Pos(j)$ در دور i ام از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$V(j)^{it} = \gamma \cdot V(j)^{it-1} + \alpha \cdot (BPos(it) - Pos(i)^{i-1}) + \beta \cdot (GPos(it) - Pos(i)^{i-1}) \quad (26)$$

در این روش همانگونه که در معادله بالا آورده شده است ضرایب α و β و γ ضرایب وزن دهی متغیری می باشند که برای بهبود یافتن جواب بهینه به این الگوریتم اضافه شده اند. α و β دو ضریب وزن دهی هستند که مقدار بیشینه ثابت اولیه دارند و در طول اجرا به طور تصادفی از مقدار بیشینه تولید می شوند. مقدار بیشینه α با افزایش سیکل های الگوریتم به تدریج کاهش می یابد تا الگوریتم بتواند به صورت بهینه همگرا گردد. $BPos(i)$ بهترین بردار در مجموعه بردارهای دور i ام است که کمترین مقدار خطا را تولید کرده و $GPos(i)$ مقدار بهترین بردار محاسبه شده تا دور $i-1$ ام می باشد.

الگوریتم پس از محاسبه $V(i)$ و بروز رسانی هر بردار $Pos(j)$ ، آن ها را ارزیابی کرده و خطای برآورد را با محاسبه تابع هزینه از معادله (۶) بدست می آورد. پس از آن بهترین بردار آن دور که کمترین خطا را تولید کرده است، استخراج شده و در $GPos$ قرار می گیرد. پس از پایان یک دور، مقدار بیشینه α بروز رسانی می شود و بهترین بردار پارامتر W انتخاب می شود. در پایان حلقه اصلی الگوریتم، بهترین بردار پارامتر به خروجی تابع ارسال می شود.

پس از کشف W^{k_0} روند افزایشی الگوریتم ازدحام ذرات برای محاسبه W^{k_l} $l=1,2,3,\dots$ شروع می شود. در این مرحله یک پروسه تکراری شروع شده که از یک مجموعه P تایی مقادیر اولیه تصادفی شروع به کار می کند و پارامترهای جدید فضای حالت را جستجو می کند. جهت کاهش هزینه محاسباتی سیستم و امکان

۳- الگوریتم بهینه سازی افزایشی ازدحام ذرات

روش بهینه سازی ازدحام ذرات، یک روش سراسری کمینه سازی است که با استفاده از آن می توان به حل مسائلی که جواب آن ها یک نقطه یا سطح در فضای چندبعدی می باشد، پرداخت. در این الگوریتم مجموعه ذراتی در فضای پاسخ فرض می شوند و یک سرعت ابتدایی به آن ها اختصاص داده می شود، همچنین کانال های ارتباطی بین ذرات در نظر گرفته می شود. سپس این ذرات در فضای پاسخ حرکت می کنند، و نتایج حاصله بر مبنای یک ملاک شایستگی پس از هر بازه زمانی محاسبه می شود. باگذشت زمان، ذرات به سمت ذراتی که دارای ملاک شایستگی بالاتری هستند و در گروه ارتباطی یکسانی قرار دارند، شتاب می گیرند. علی رغم اینکه هر روش در محدوده ای از مسائل به خوبی کار می کند، این روش در حل مسائل بهینه سازی بلادرنگ در کنترل کننده کارکرد خوبی از خود نشان نمی دهد.

در اینجا یک روش جدید برای بهینه سازی کنترلی که ایده های تکاملی ازدحام ذرات و سیستم های بلادرنگ را با هم ترکیب کرده است تا راهکار کامل تری از تکامل سیستم ارائه نماید. این روش بسیاری از مشکلات محاسباتی موجود در طراحی کنترل بهینه را حل نموده است و مزایای روش های گذشته را نیز داراست.

کوادرورتور، حالات سرعت زاویه‌ای به‌عنوان ورودی مجازی کنترلی در کنترل‌کننده گام به عقب انتگرالی منظور می‌گردد. مرحله نخست در طراحی کنترل‌کننده طراحی‌شده‌ی گام به عقب انتگرالی در کوادرورتور، محاسبه خطای تعقیب می‌باشد که معادلات آن به‌صورت (۲۷) و (۲۸) است [۲۷]:

$$e_1 = \phi_d - \phi \quad (27)$$

$$\frac{de_1}{dt} = \dot{\phi}_d - \omega_x \quad (28)$$

e_1 خطای مقدار زاویه رول است و معادله ۲۸ مشتق زمانی خطا را تعیین می‌کند. بنابراین برای تولید رفتار مطلوب برای سیستم کوادرورتور، حالات سرعت زاویه‌ای به‌عنوان ورودی مجازی کنترلی در کنترل‌کننده گام به عقب انتگرالی به‌صورت (۲۹) منظور شده است.

$$\omega_{xd} = c_1 e_1 + \dot{\phi}_d + \lambda_1 \chi_1$$

$$x_1 = \int_0^t e_1 dt \quad (29)$$

که λ_1 و c_1 ضرایب مثبت کنترلی هستند و x_1 انتگرال خطای تعقیب زاویه رول است. با توجه به اینکه ω_x خطای منحصر به فرد خود (e_2) را دارد، بنابراین آن را به‌صورت (۳۰) تعریف می‌کنیم:

$$\frac{de_2}{dt} = c_1 (\dot{\phi}_d - \omega_x) + \ddot{\phi}_d + \lambda_1 e_1 - \ddot{\phi} \quad (30)$$

که در آن خطای تعقیب سرعت زاویه‌ای است و به‌صورت (۳۱) تعریف می‌شود:

$$e_2 = \omega_{xd} - \omega_x \quad (31)$$

با استفاده از معادلات ۱۸ و ۱۹ خطای تعقیب رول را به‌صورت (۳۲) بازنویسی می‌کنیم:

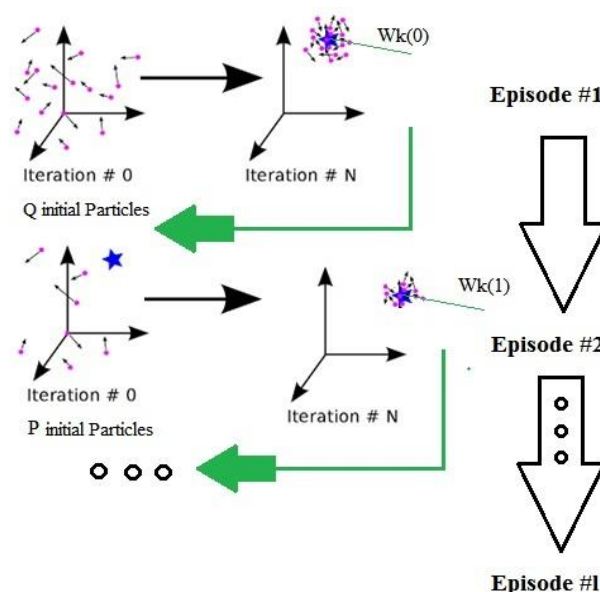
$$\frac{de_1}{dt} = -c_1 e_1 - \lambda_1 \chi_1 + e_2 \quad (32)$$

با جابجا کردن $\ddot{\phi}$ در معادله ۱۸ با معادله متناظر آن در رابطه (۶) ورودی کنترلی U_2 در معادله پدیدار می‌شود:

$$\frac{de_2}{dt} = c_1 (\dot{\phi}_d - \omega_x) + \ddot{\phi}_d + \lambda_1 e_1 - \dot{\theta} \psi a_1$$

$$- \dot{\theta} a_2 \Omega_r - b_1 U_2 \quad (33)$$

اجرای بلادرنگ کنترل‌کننده فرض می‌کنیم رابطه $P \ll Q$ برقرار باشد. به جمعیت اولیه تصادفی الگوریتم ذره جدید W^{k0} را اضافه می‌کنیم و الگوریتم را مشابه قبل اجرا می‌کنیم تا W^{ki} بدست آید. این روند در هر لحظه زمانی تکرار می‌شود تا مقدار W^{ki-1} با داشتن W^{ki} محاسبه گردد. این روند در شکل ۲ به تصویر درآمده است.



شکل ۲ الگوریتم ازدحام افزایشی ذرات

۴- پیاده‌سازی کنترل‌کننده گام به عقب انتگرالی موقعیت با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

در ادامه روند پیاده‌سازی کنترل‌کننده گام به عقب انتگرالی را برای کنترل موقعیت کوادرورتور بررسی می‌شود. با توجه به اینکه کنترل موقعیت کوادرورتور با کنترل زاویه‌ای آن همراه است، از این رو ابتدا روند پیاده‌سازی کنترل وضعیت زاویه‌ای سیستم بررسی می‌شود.

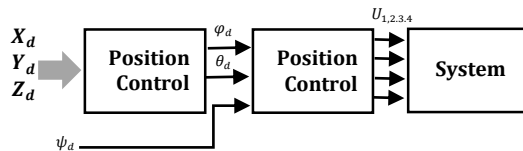
۴-۱- کنترل وضعیت کوادرورتور

کنترل وضعیت یکی از مهم‌ترین قسمت‌های طراحی کنترل‌کننده برای کوادرورتور است. این کنترل‌کننده، وضعیت سه‌بعدی سیستم را در موقعیت‌های مطلوب حفظ می‌کند. در کنترل‌کننده گام به عقب انتگرالی با در نظر گرفتن برخی از حالت‌های سیستم به‌عنوان ورودی کنترلی مجازی و با بررسی پایداری لیاپانوف سیستم، ورودی‌های کنترلی برای سیستم تعیین می‌شوند. بنابراین برای تولید رفتار مطلوب برای سیستم

۴-۳- کنترل موقعیت کوادروتور

کنترل کننده موقعیت، کوادروتور را به سمت موقعیت افقی مطلوب (x,y) هدایت می کند. حرکت افقی با جهت گیری بردار وضعیت (ϕ, θ) به سمت مسیر حرکت مطلوب صورت می گیرد. همان گونه که در شکل شماره ۳ نشان داده شده است، در عمل، کنترل کننده موقعیت با تغییر زوایای رول و پیچ مطلوب و بامنظور کردن موقعیت مطلوب x_d و y_d از موقعیت (x,y) انجام می شود.

همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است کنترل کننده موقعیت با توجه به مقادیر مطلوب ورودی زوایای رول و پیچ مطلوب برای رسیدن به موقعیت مطلوب را تعیین می کند. کنترل کننده وضعیت در هر لحظه با توجه به مقادیر مطلوب زوایای رول، پیچ و یاو مقادیر ورودی های کنترلی را مشخص می کند.



شکل ۳ کنترل موقعیت کوادروتور

بنابراین کنترل کننده موقعیت، زوایای مطلوب را به عنوان خروجی تولید می کند که توسط کنترل کننده زوایا همان گونه که در شکل ۳ نشان داده شده در هر لحظه دنبال می شود. انتقال بردار پیشران به محورهای مختصات زمینی با ماتریس R انجام می شود. با منظور کردن تغییر زاویه کم در ماتریس (۴۱) داریم:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & \psi & \theta \\ \psi & 1 & -\phi \\ -\theta & \phi & 1 \end{bmatrix} \quad (41)$$

از معادله ۱۵ و ۴۱، دینامیک حرکت افقی پس از ساده سازی به صورت زیر می باشد:

$$\begin{bmatrix} m\ddot{x} \\ m\ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\theta U_1 \\ \phi U_2 \end{bmatrix} \quad (42)$$

خطای تعقیب موقعیت های x و y به روش گام به عقب انتگرالی به صورت (۴۳) می باشند:

$$\begin{aligned} e_9 &= x_d - x \\ e_{11} &= y_d - y \end{aligned} \quad (43)$$

بنابراین خطای تعقیب سرعت نیز این چنین تعریف می شود:

بنابراین معادله مطلوب برای خطای تعقیب سرعت زاویه ای به صورت (۳۴) است:

$$\frac{de_2}{dt} = -c_2 e_2 - e_1 \quad (34)$$

بنابراین با ترکیب معادلات بالا ورودی کنترلی U_2 به صورت (۳۵) تعریف می شود:

$$U_2 = \frac{1}{b_1} \left[(1-c_1^2+\lambda_1)e_1 + (c_1+c_2)e_2 - c_1\lambda_1\chi_1 + \ddot{\phi}_d - \dot{\theta}\dot{\psi}a_1 - \dot{\theta}a_2\Omega_r \right] \quad (35)$$

به همین ترتیب ورودی کنترلی برای پیچ و یاو به صورت (۳۶) و (۳۷) محاسبه می شوند:

$$U_3 = \frac{1}{b_2} \left[(1-c_3^2+\lambda_2)e_3 + (c_3+c_4)e_4 - c_3\lambda_2\chi_2 + \ddot{\theta}_d - \dot{\phi}\dot{\psi}a_3 + \dot{\phi}a_4\Omega_r \right] \quad (36)$$

$$U_4 = \frac{1}{b_3} \left[(1-c_5^2+\lambda_3)e_5 + (c_5+c_6)e_6 - c_5\lambda_3\chi_3 \right] \quad (37)$$

که $(c_3, c_4, c_5, c_6, \lambda_2, \lambda_3) > 0$ ضرایب مثبت کنترلی و χ_2, χ_3 و χ_1 به ترتیب انتگرال خطای تعقیب رول و پیچ و یاو هستند.

۴-۲- کنترل ارتفاع کوادروتور

کنترل کننده ارتفاع، فاصله پرنده از زمین را به اندازه مطلوب تنظیم و کنترل می کند. خطای تعقیب ارتفاع به صورت (۳۸) تعریف می شود:

$$e_7 = z_d - z \quad (38)$$

خطای سرعت تعقیب نیز به صورت (۳۹) تعریف می شود:

$$e_8 = c_7 e_7 + \dot{z}_d + \lambda_4 \chi_4 - \dot{z} \quad (39)$$

پس ورودی کنترلی برای کنترل ارتفاع به صورت (۴۰) خواهد بود:

$$U_1 = \frac{m}{\cos \phi \cos \theta} \left[g + (1-c_7^2+\lambda_4)e_7 + (c_7+c_8)e_8 - c_7\lambda_4\chi_4 \right] \quad (40)$$

که ضرایب c_7, c_8, λ_4 ضرایب مثبت کنترلی هستند.

در تابع هزینه t_s بیانگر زمان نشست سیستم، t_r زمان فراز، e_{ss} خطای ماندگار و M_p بیشینه فرا جهش پاسخ می‌باشد. مقدار β برابر ۱/۴ در نظر گرفته شده که در نتیجه به هر عبارت، میزان اهمیت یکسانی در تابع هزینه اختصاص داده شده است. الگوریتم-های بهینه‌ساز با تنظیم ضرایب مثبت کنترل کننده و کاهش تابع هزینه معرفی شده، به بهینه شدن رفتار کنترلی سیستم کمک می‌کنند. مقادیر اولیه ضرایب با استفاده از الگوریتم به صورت تصادفی در بازه‌ی مشخص شده برای الگوریتم تعیین می‌شود و در ادامه این ضرایب با هدف کاهش تابع هزینه تنظیم می‌شوند.

۵- شبیه‌سازی کنترلر انتگرالی بهینه

در این بخش در ابتدا الگوریتم ازدحام افزایشی ذرات برای تنظیم ضرایب کنترلی کنترل کننده گام به عقب انتگرالی پیاده‌سازی شده تا به بررسی و بهبود عملکرد کنترل کننده پس از تنظیم بهره‌های کنترلی توسط این روش فرا ابتکاری پرداخته شود. در شکل شماره ۵ روند کاهش تابع هزینه برای یافتن مقادیر مثبت کنترل کننده در طی ۵۰ سیکل نشان داده شده است. پس از ۵۰ سیکل انجام روند الگوریتم، تغییرات ضرایب کنترلی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند. سپس به شبیه‌سازی کنترل کننده طراحی شده در محیط متلب برای تعیین کارایی آن، پرداخته می‌شود. پاسخ کنترل کننده گام به عقب انتگرالی وضعیت نسبت به ورودی پله بررسی شده است. پاسخ این شبیه‌سازی در شکل ۴ آورده شده است همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده است در روند کنترل وضعیت کوادروتور زوایای رول، پیچ و یاو از موقعیت زاویه‌ای صفر به ترتیب به موقعیت‌های ۳۰، ۲۰ و ۴۵- درجه تغییر یافته‌اند و موقعیت عمودی کوادروتور از ۰ به ۳ متر تغییر ارتفاع داده است.

$$e_{10} = c_9 e_9 - \dot{x}_d - \lambda_5 \chi_5 - \dot{x} \quad (44)$$

$$e_{12} = c_{11} e_{11} - \dot{y}_d - \lambda_6 \chi_6 - \dot{y}$$

به این ترتیب ورودی‌های کنترلی به صورت (۴۵) و (۴۶) خواهند بود:

$$U_x = \frac{m}{U_l} [(1 - c_9^2 + \lambda_5) e_9 + (c_9 + c_{10}) e_{10} - c_9 \lambda_5 \chi_5] \quad (45)$$

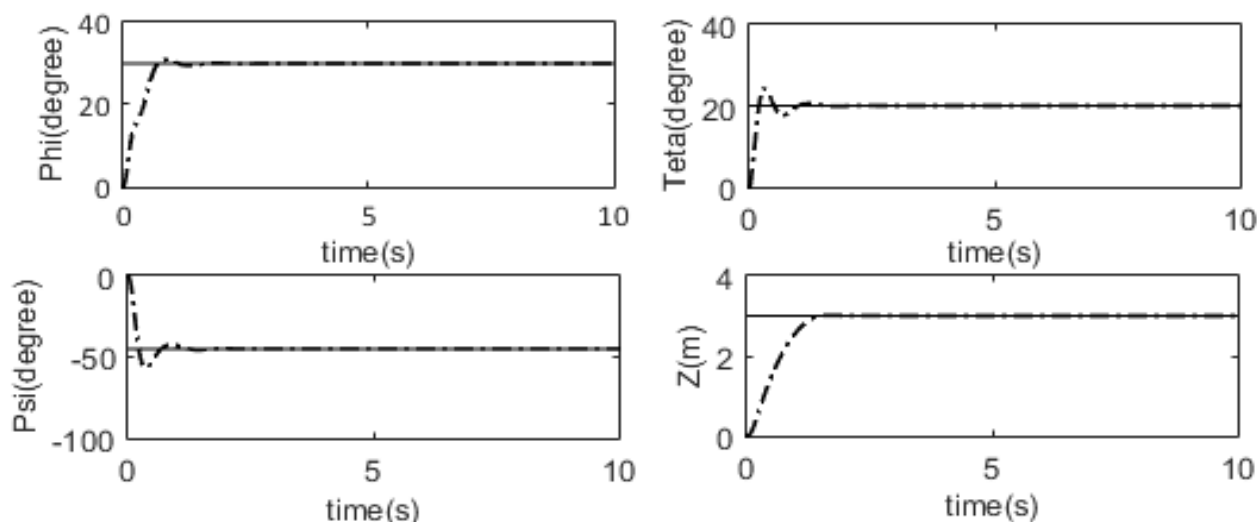
$$U_y = -\frac{m}{U_l} [(1 - c_{11}^2 + \lambda_6) e_{11} + (c_{11} + c_{12}) e_{12} - c_{11} \lambda_6 \chi_6] \quad (46)$$

که در آن $c_9, c_{10}, c_{11}, c_{12}, \lambda_5, \lambda_6$ مقادیر مثبت طراحی هستند

۴-۴- تنظیم ضرایب کنترلی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

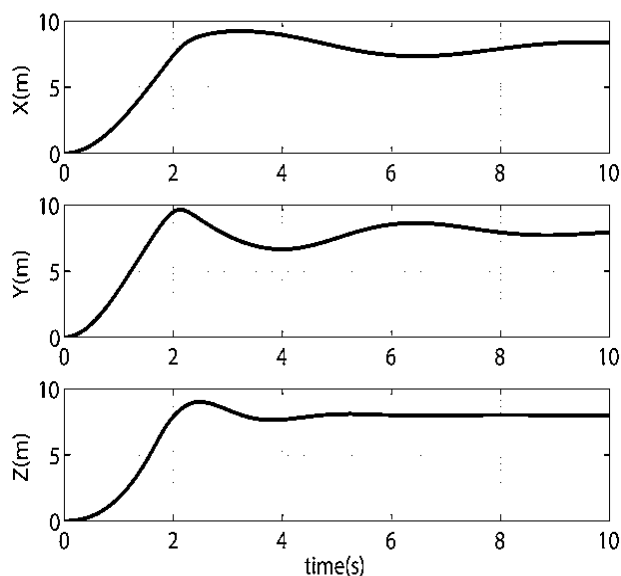
در پیاده‌سازی کنترل کننده گام به عقب ضرایب مثبت در معادلات با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز محاسبه و مقداردهی می‌شوند. بدین منظور مشخصه‌های سیستم از جمله: زمان پاسخ‌دهی سیستم، خطای ماندگار سیستم، فرا جهش و زمان نشست سیستم در تابع هزینه برای بهینه‌سازی منظور شده‌اند لازم به ذکر است که ورودی‌های کنترلی در طراحی محدود شده‌اند. به این ترتیب تابع هزینه معرفی شده برای تنظیم ضرایب کنترلی توسط الگوریتم ذرات طبق زیر آورده شده است.

$$Cost = e^{-\beta} (M_p + e_{ss} + t_r) + (1 - e^{-\beta}) t_s \quad (47)$$

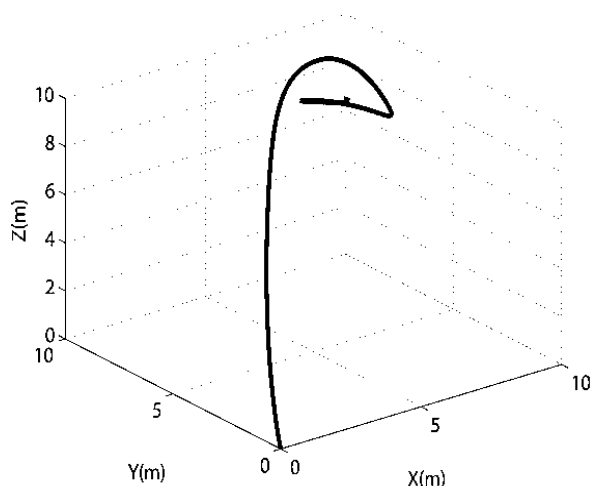


شکل ۴ پاسخ کنترل کننده وضعیت و ارتفاع سیستم به ورودی پله

و مقصد از این جهت مورد توجه است که ربات کمترین انرژی را در طول مسیر مصرف کند. در این مقاله تولید مسیر بهینه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام افزایشی ذرات صورت گرفته که در آن وجود مانع‌های از پیش تعیین شده مسئله را چالش برانگیز می‌کند. تابع هزینه معرفی شده در این بخش طول مسیر تولید شده از مبدأ تا مقصد است که هدف یافتن کوتاه‌ترین مسیر، با وجود عدم برخورد با موانع محیط می‌باشد.



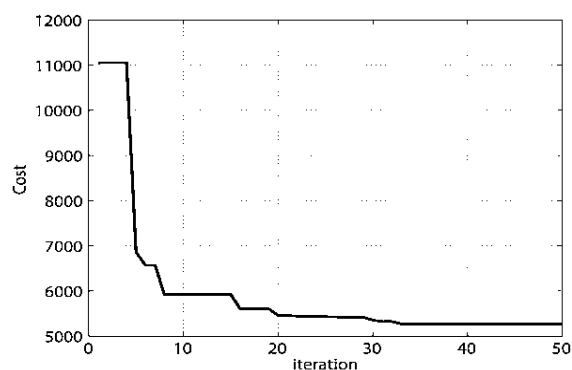
شکل ۸ پاسخ سیستم به ورودی پله



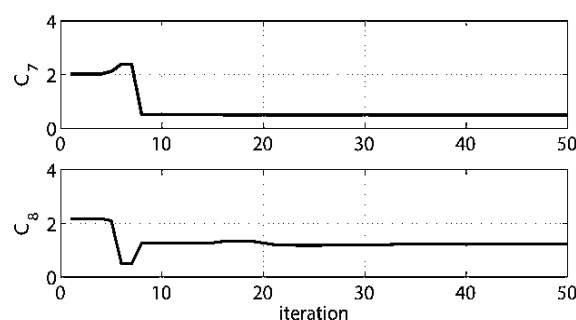
شکل ۹ حرکت در فضای سه بعدی در پاسخ به ورودی پله

شکل شماره ۱۰ نمای فرضی از محیط سه بعدی مورد نظر را با وجود موانع کروی نشان می‌دهد.

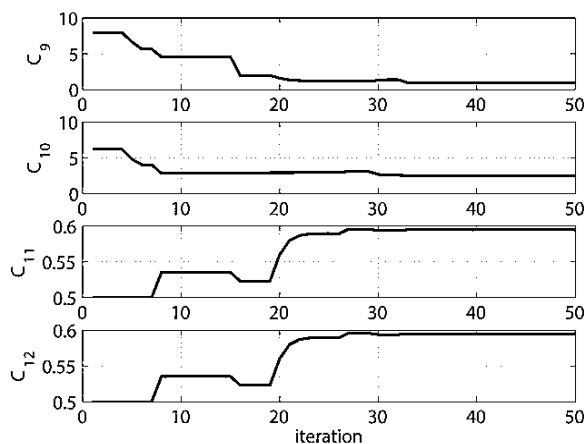
مسیر مطلوب حرکت کوادروتور برای شبیه‌سازی در این شبیه‌سازی با مبدأ حرکت به مختصات $[-5, -5, -5]$ و نقطه‌ای به مختصات $[10, 10, 10]$ به عنوان مقصد انتخاب شده است.



شکل ۵ تغییرات تابع هزینه



شکل ۶ تغییرات ضرایب کنترلی ارتفاع

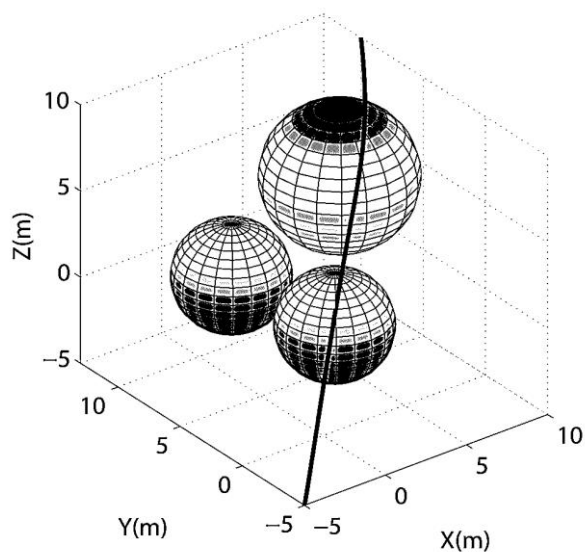


شکل ۷ تغییرات ضرایب کنترلی x و y

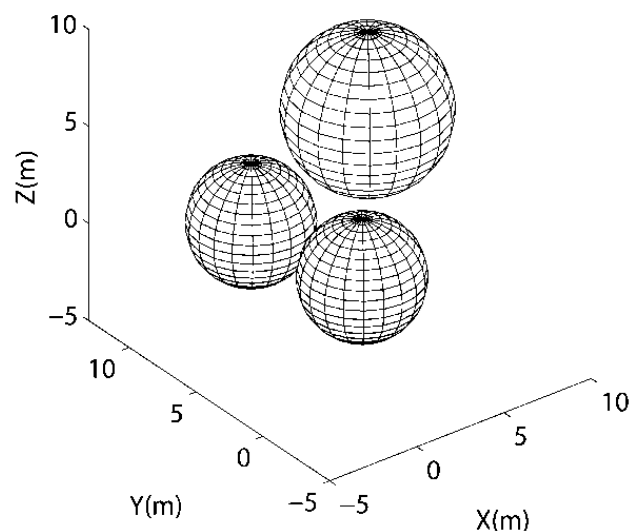
پاسخ سیستم برای ورودی به صورت پله و مقادیر مطلوب $x=10$ و $y=10$ و $z=10$ برای هر سه حالت موقعیت x ، y و z در شکل شماره ۸ نشان داده شده که در مجموع حرکت در سه بعد مانند شکل شماره ۹ برای سیستم کوادروتور حاصل شده است.

۶- تولید مسیر با استفاده از الگوریتم ازدحام افزایشی ذرات

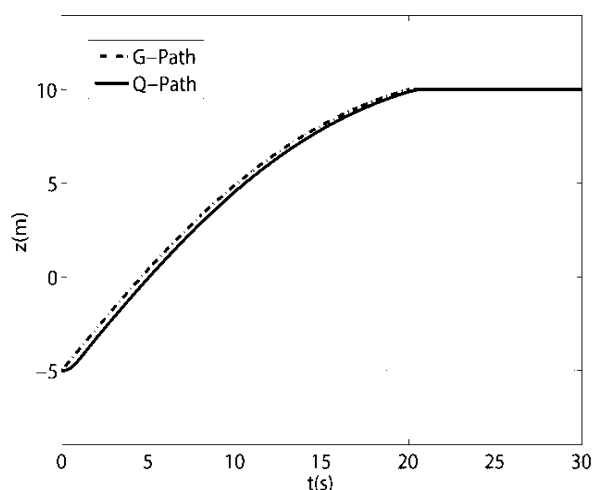
تاکنون روش‌های متعددی برای تولید مسیر در فضای سه بعدی برای ربات‌ها ارائه شده است. یافتن مسیر بهینه بین نقطه شروع



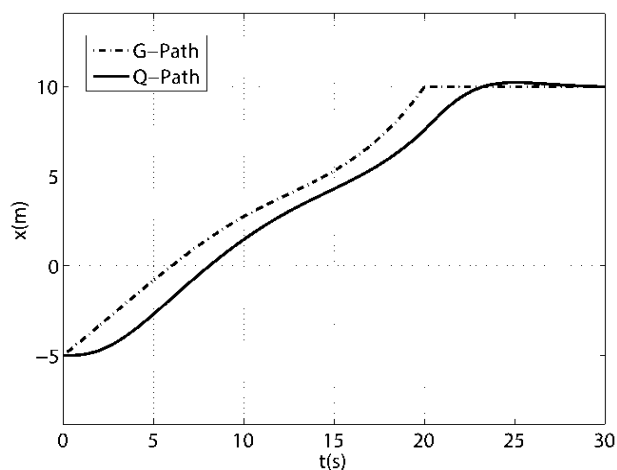
شکل ۱۲ مسیر بهینه بین مبدأ و مقصد



شکل ۱۰ نمای سه بعدی موانع کروی



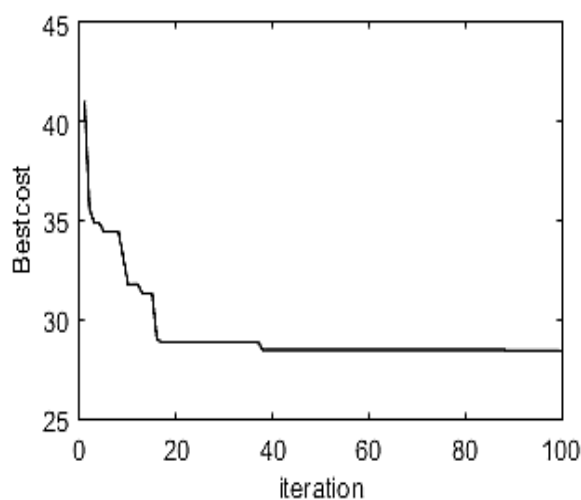
شکل ۱۳ حرکت کوادروتور در راستای Z



شکل ۱۴ حرکت کوادروتور در راستای X

به این ترتیب پس از انجام ۱۰۰ سیکل در الگوریتم تکاملی ازدحام ذرات، روند کاهش تابع هزینه برای پیدا کردن مسیر بهینه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مسیر بهینه طراحی شده توسط الگوریتم تکاملی ازدحام ذرات برای عبور از این موانع و رسیدن به نقطه‌ی هدف نیز در شکل شماره ۱۰ نشان داده شده است. در ادامه این مسیر به عنوان ورودی کنترلی کنترل کننده گام به عقب انتگرالی به کوادروتور داده شده است.

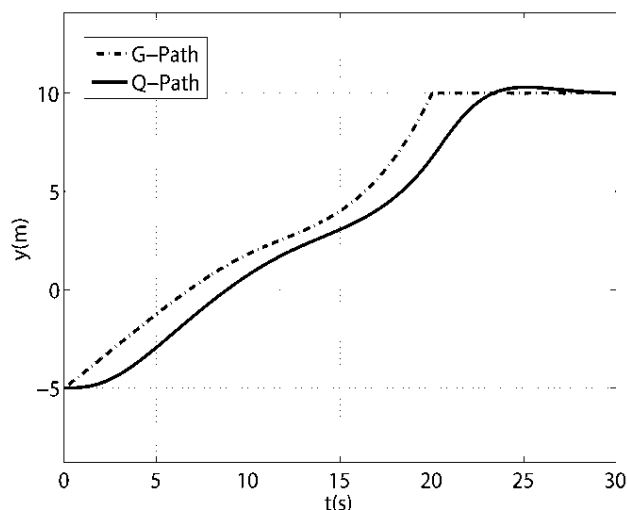
مسیر بهینه بین مبدأ و مقصد که توسط الگوریتم ازدحام افزایشی ذرات شناسایی می شود به عنوان ورودی مطلوب به کنترل کننده انتگرال گام به عقب انتگرالی موقعیت داده می شود. به این ترتیب پاسخ سیستم به ورودی موردنظر در مدت زمان ۳۰ ثانیه در شکل های ۱۳ الی ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۱ تابع هزینه مسیریابی

controller and a hybrid PD controller for quadrotor, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17(10), pp. 194-204, (2018).

- [2] Pulok, M., Uttam, K., A Study of the aerodynamics of a helicopter rotor blade, In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Vol. 59360, pp. V001T03A025, *American Society of Mechanical Engineers*, (2019).
- [3] Uluocak, S., Mustafa, P., Oğuz, U., Experimental investigation of tip anhedral effects on the aerodynamics of a model helicopter rotor in hover, *Aerospace Science and Technology*, (2021).
- [4] Padfield, D., Helicopter flight dynamics: including a treatment of tiltrotor aircraft, *John Wiley & Sons*, (2018).
- [5] Offermann, A., Pedro, C., Jérôme M., Nonlinear model and control validation of a tilting quadcopter, In *2020 28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, pp. 50-55. IEEE, (2020).
- [6] Chao, H., YongCan, C., YangQuan, C., Autopilots for small unmanned aerial vehicles: a survey, *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 8.1, PP. 36-44, (2010).
- [7] Lee, D., Autonomous feature following for visual surveillance using a small unmanned aerial vehicle with gimbaled camera system, *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 8.5, PP. 957-966, (2010).
- [8] Han, D., Development of unmanned aerial vehicle (UAV) system with waypoint tracking and vision-based reconnaissance, *International Journal of Control, Automation and Systems* Vol. 8.5, PP. 1091-1099, (2010).
- [9] Zhang, X., Yuansen, D., Fang, C., Linlin, Q, Indoor position control of a quadrotor uav with monocular vision feedback, In *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, pp. 9760-9765, IEEE, (2018).
- [10] Togonon, M., Antonio, F., Theory and applications for control of aerial robots in physical interaction through tethers, Vol. 140. Springer Nature, (2020).
- [11] Razmi, H., Afshinfar, S., Neural network-based adaptive sliding mode control design for position and attitude control of a quadrotor UAV, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 91, PP. 12-27, (2019).
- [12] Noordin, A., Mohd, A., Zaharuddin, M., Sensor fusion for attitude estimation and PID control of quadrotor UAV, *International Journal of Electrical*



شکل ۱۵ حرکت کوادروتور در راستای y

شکل ۱۲ یک نمایش عمومی از مسیر بهینه محاسبه شده توسط الگوریتم در سه بعد است. روند طی کردن این مسیر توسط کنترل کننده در راستاهای Z و X و y به ترتیب در تصاویر ۱۳ الی ۱۵ نمایش داده شده است. برای هر سه راستا موقعیت اولیه کوادروتور در مختصات -5 و مختصات مطلوب 10 است. از ثانیه 20 الی 30 ورودی مطلوب روی نقطه‌ی پایانی مسیر ثابت می ماند تا به کوادروتور زمان لازم برای رسیدن به مکان نقطه هدف داده شود. همان گونه که از پاسخ سیستم مشخص می باشد در کنترل ارتفاع، خروجی کوادروتور با خطای کمتری بر ورودی مطلوب منطبق است اما کنترل در جهت x و y زمان بیشتری برای رسیدن به مسیر مطلوب نیاز دارد.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله کنترل کننده گام به عقب انتگرالی طراحی شده توسط الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات در جهت کاهش خطای سیستم بهینه سازی شد. در راستای بهینه سازی مسیر حرکت کوادروتور از الگوریتم ازدحام ذرات جهت کاهش مصرف انرژی ربات در طی مسیر بهره گیری شد. با استفاده از محیط متلب به شبیه سازی حرکت کوادروتور پرداخته شد که نتایج و نمودارها عملکرد خوب ربات در مسیر طراحی شده و عبور از موانع از پیش تعیین شده را نشان می دهد.

۸- مراجع

- [1] Norouzi, R., Shahbazi, H., Jamshidi, K., Design and implementation of a neural intelligent

- Automation and Systems*, Vol. 9.1, PP. 69-79, (2011).
- [21] Ferdaus, M., Sreenatha, G., Mahardhika, P., Matthew, A., Towards the use of fuzzy logic systems in rotary wing unmanned aerial vehicle: a review, *Artificial Intelligence Review*, Vol. 1, PP. 257-290, (2020).
- [22] Ma, H., Mou, C., Gang, F., Qingxian, W., Disturbance-observer-based adaptive fuzzy tracking control for unmanned autonomous helicopter with flight boundary constraints, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, (2022).
- [23] Hu, Y., Yanping, Y., Shu, L., Yaoming, Z., Fuzzy controller design of micro-unmanned helicopter relying on improved genetic optimization algorithm, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 98, (2020).
- [24] Vitzilaios, N., Nikos, C., An experimental test bed for small unmanned helicopters, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 54.5, PP. 769-794, (2009).
- [25] Khalesi, M. H., Salarieh, H., Saadat Foumani, M., System identification and robust attitude control of an unmanned helicopter using novel low-cost flight control system, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 5, PP. 634-645, (2020).
- [26] Wu, Y., Development and Implementation of a control system for a quadrotor UAV, *Hochschule Ravensburg-Weingarten, Μάπτιος*, (2009).
- [27] Nguyen, K. D., Cheolkeun, H., Development of hardware-in-the-loop simulation based on gazebo and pixhawk for unmanned aerial vehicles, *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 1, PP. 238-249, (2018).
- [28] Tomashevich, S., Rostislavich Andrievsky, B., Full control of a quadrotor with simple adaptive control, *Differential Equations & Control Processes*, (2020).
- and *Electronic Engineering and Telecommunications*, Vol. 4, PP. 183-189, (2018).
- [13] Lee, D., Jin Kim, H., Shankar, S., Feedback linearization vs. adaptive sliding mode control for a quadrotor helicopter, *International Journal of control, Automation and systems*, Vol. 3, PP. 419-428, (2009).
- [14] Erginer, B., Erdiñç, A., Design and implementation of a hybrid fuzzy logic controller for a quadrotor VTOL vehicle, *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 10.1, PP. 61-70, (2012).
- [15] Sharma, A., Amol, B., Controlling of quad-rotor uav using pid controller and fuzzy logic controller, *International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering*, Vol. 1.2, PP. 38-41, (2012).
- [16] Glida, E., Latifa, A., Abdelghani, C., Chouki, S., Gabriele, P., Optimal model-free fuzzy logic control for autonomous unmanned aerial vehicle, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 5, PP. 952-967, (2022).
- [17] Sarabakha, A., Erdal, K., Online deep fuzzy learning for control of nonlinear systems using expert knowledge, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 7, PP. 1492-1503, (2019).
- [18] Rusli, A., Mohd, A., Aripin, M., Azmi, M., Kasno, A., Khamis, A., Rizman, Z. I., Modelling of unmanned aerial vehicle (UAV) for altitude control using system identification technique, *J Fund Appl Scie*, Vol. 10, PP. 936-950, (2018).
- [19] Fung, E., Hoi, K., Smart hanger dynamic modeling and fuzzy controller design, *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 9.4, PP. 691-700, (2011).
- [20] Hafafa, A., Ferhat, L., Kouider, L., A Numerical structural approach to surge detection and isolation in compression systems using fuzzy logic controller, *International Journal of Control*,

مروری بر عملکرد، انواع و کاربردهای مواد فعال سطحی (سورفکتانت ها) در جریان سیالات چندفازی

چکیده: در این مقاله مواد فعال سطحی (سورفکتانت ها) و تأثیر آن بر جریان سیالات چند فازی مورد مطالعه قرار گرفته است. ابتدا نحوه عملکرد سورفکتانت ها بیان شده است. بدین منظور، تعاریف تنش سطحی و نحوه تغییر آن در حضور سورفکتانت ها بررسی شده است. همچنین، فیزیک توزیع سورفکتانت ها در جریان چندفازی و جذب و دفع آن در سطح مشترک گزارش شده است. تغییرات فیزیکی سطح مشترک دوفاز به دلیل حضور سورفکتانت ها از طریق تعادل نیروها و تغییر در تنش سطحی و تعریف اثر مارانگونی بررسی شده است. انواع سورفکتانت ها و خواص آن ها بیان شده است. در نهایت کاربردهای مهم سورفکتانت ها در صنعت و زندگی روزمره با جزئیات ذکر شده است. این بررسی نشان می دهد که سورفکتانت ها به عنوان یکی از عوامل موثر بر جریان چندفازی نیاز به مطالعه روز افزون دارد. شناخت بهتر این مواد می تواند در دستکاری و بهینه سازی کاربردهای دارای جریان سیال چندفازی بسیار مفید باشد.

واژه های راهنما: مواد فعال سطحی، سورفکتانت ها، جریان سیالات چندفازی، تنش سطحی، اثرات مارانگونی، انواع، کاربردها

یاسر جعفری
دانشجوی دکتری

محمد طیبی رهنی
استاد،
دانشکده مهندسی هوافضا،
دانشگاه صنعتی شریف، تهران

محمدرضا سلیمی*
استادیار، پژوهشگاه هوافضا،
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری،
تهران

رینهارد میلر
استاد، گروه بیوفیزیک ماده نرم،
دانشگاه صنعتی دماشتارت،
آلمان

مقاله مروری
دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۸
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

Yaser Jafari
Ph.D. Candidate

Mohammad
Taeibi Rahni
Professor, Faculty of
Aerospace Engineering
Sharif University of
Technology, Tehran

Mohammad Reza
Salimi*
Assistant Professor,
Aerospace Research
Institute, Ministry of
Science, Research and
Technology, Tehran

Reinhard Miller
Professor, Department
of Soft Matter
Biophysics, TU
Darmstadt, Germany

An overview of the functioning, types, and applications of surface active agents (surfactants) in multiphase flow

Abstract: In this article, Surface Active Agents (Surfactants) and its effect on the Multiphase Flow have been studied. First, the functioning of surfactants has been explained. For this purpose, the definitions of surface tension and how it changes in the presence of surfactants have been investigated. Also, the physics of surfactant distribution in multiphase flow and its absorption and repulsion at the interface have been reported. The physical changes of the two-phase interface due to the presence of surfactants have been investigated through the balance of forces and the change in surface tension and the definition of the Marangoni effect. Types of surfactants and their properties are stated. Finally, the important applications of surfactants in industry and daily life are mentioned in detail. This review shows that surfactants as one of the effective factors on multiphase flow need to be studied more and more. A better understanding of these materials can be very useful in manipulating and optimizing multiphase flow applications.

Keywords: Surface active agents, Surfactants, Multiphase flow, Surface tension, Marangoni effects, Types, Applications

۱- مقدمه

و تأثیرات آن پرداخته شود. همچنین، انواع سورفکتانت ها دسته بندی و ویژگی های هر یک توضیح داده خواهد شد. در انتها، بطور گسترده کاربردهای علمی و صنعتی سورفکتانت ها در زندگی روزمره انسان و فواید آن بیان خواهد شد.

۲- نحوه عملکرد سورفکتانت ها در جریان های سیالات چندقازی و تأثیرات آن

در جریان های چندقازی، سطح مشترک قابل تغییر شکل بین دو سیال در واقع یک لایه نازک است که به اندازه چند مولکول ضخامت دارد [۱]. تعریف مشخصی از این ضخامت وجود ندارد، زیرا خواص فیزیکی سیال در ناحیه سطح مشترک به سرعت ولی به صورت پیوسته از مقادیر یک فاز به مقادیر فاز دیگر تغییر می کند. به دلیل عدم وجود تئوری های مولکولی مناسب برای توصیف مرز مشترک، آن به عنوان یک مرز بدون جرم و با ضخامت صفر در نظر گرفته می شود که در آن مقادیر حجمی خواص سیال در دو طرف مرز مشترک ثابت است و به طور ناپیوسته در گذر از مرز مشترک تغییر می کند. مرز مشترک با تنش سطحی توصیف می شود، که به حالت ترمودینامیکی موضعی مانند دما، فشار و غلظت املاح مانند سورفکتانت ها و ذرات باردار بستگی دارد، اما به این که آیا سطح مشترک در حال تغییر شکل یا حرکت ماکروسکوپی است، وابسته نیست. برای درک نحوه عملکرد سورفکتانت ها در جریان های چندقازی ابتدا باید مفهوم تنش سطحی معرفی شود. از دو دیدگاه می توان به مفهوم تنش سطحی را بررسی کرد که عبارتند از: نیروی وارد بر مولکول های سیال برای باقیماندن در سطح مشترک دوفاز و انرژی آزاد لازم برای حداقل کار لازم برای تولید یک واحد سطح مشترک بین دو فاز.

۲-۱- تعاریف تنش سطحی در جریان چندقازی و تأثیر حضور سورفکتانت بر آن

در دیدگاه اول، تنش سطحی معمولاً به عنوان نیروی جذب خالص به داخل تعریف می شود که توسط مولکول ها در سطح مشترک دو سیال احساس می شود، تعرف می شود [۱۰]. به عبارت دیگر، این خاصیت مایع برای مقاومت در برابر نیروی خارجی وارد بر مولکول های موجود در سطح مشترک با سیال

عوامل فعال سطحی (سورفکتانت ها)؛^۱ مولکول های آمفیفیل^۲ هستند که در سطح مشترک جذب می شوند و می توانند دینامیک سیستم های جریان دو فازی را به شدت تحت تأثیر قرار دهند [۳-۱]. آمفیفیل یک ترکیب شیمیایی است که دارای هر دو خاصیت آب دوست (هیدروفیل)^۳ و آب گریز (لیپوفیل)^۴ است. کلمه سورفکتانت مخفف عبارت لاتین عوامل فعال سطحی^۵ که ویژگی دوگانه آب دوستی و آب گریزی آن خود نشان دهنده ماهیت فعال سطحی این دسته از ترکیبات و تمایل آنها به جذب در سطح مشترک است. این تمایل باعث تغییر تنش سطحی و در نتیجه تغییرات قابل توجهی در خواص سطحی جریان سیال چندقازی می شوند [۴-۵]. سورفکتانت ها آنها ساختار مولکولی با زنجیره بلند دارند که به دو بخش قطبی و غیر قطبی تقسیم می شود [۳]. بخش قطبی میل یا تنش قوی نسبت به حلال های قطبی نشان می دهد که به آن بخش سر آبدوست و به قسمت غیرقطبی دم آگریز گفته می شود [۱ و ۶]. دم آگریز به طور معمول یک زنجیره هیدروکربنی طولانی است که در سیال غیرقطبی قرار می گیرد [۱ و ۶]. در چندین فرآیند، سورفکتانت ها معمولاً به طور طبیعی یا به عنوان ناخالصی هایی وجود دارند که به سختی حذف می شوند. وجود سورفکتانت ها در سیستم های چندقازی، چه به صورت ناخالصی های اجتناب ناپذیر یا به عنوان مواد افزودنی، تأثیر زیادی بر شکل و دینامیک سطح مشترک دارد [۷]. انتخاب سورفکتانت بستگی به کاربرد دارد و مستلزم آگاهی از موارد زیر است [۸]:

- ویژگی های مشخصه سورفکتانت های موجود در حال حاضر (خواص فیزیکی و شیمیایی عمومی)،
- مشاهدات سطحی دخیل در کاربرد و نقش سورفکتانت در این پدیده ها و
- خواص شیمیایی سطح انواع ساختاری مختلف سورفکتانت ها و رابطه ساختار یک سورفکتانت با رفتار آن در پدیده های مختلف سطحی.

اگرچه محلول های آبی حاوی سورفکتانت ها معمولاً در بسیاری از کاربردها استفاده می شوند، اما درک جامع از نقش میکروسکوپی مولکول های سورفکتانت در گسترش پدیده ها همچنان چالش برانگیز است [۹]. در این مقاله سعی خواهد شد به جزئیات نحوه عملکرد سورفکتانت ها در جریان های چندقازی

^۴ Hydrophobe (Lipophile)^۵ Surface Active Agents^۱ Surface Active Agents (Surfactants)^۲ Amphiphiles^۳ Hydrophilic (Hydrophile)

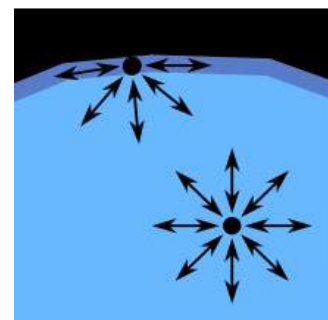
های آب و با ساختار آب در مجاورت گروه آبگریز باعث اعوجاج ساختار آب شود و انرژی آزاد سیستم را افزایش دهد. این سیستم با بیرون راندن مولکول سورفکتانت به سطح مشترک پاسخ می دهد تا تماس بین گروه آبگریز و آب را به حداقل برساند و انرژی آزاد سیستم را کاهش دهد. در نتیجه، سطح مشترک با مولکول های سورفکتانت پوشیده می شود و دم های آبگریز آن ها به سمت فاز غیر آبی (فاز دوم) می رود و در عین حال سرهای آبدوست خود را در فاز آب نگه می دارند تا عدم تشابه دو فاز در تماس با یکدیگر در فصل مشترک کاهش یابد. این کاهش در عدم تشابه (مولکول های هوا و گروه آبگریز غیرقطبی هستند) دو فاز در سطح منجر به کاهش تنش سطحی می شود. به عبارت دیگر، اکنون برای آوردن مولکول ها به سطح کار کمتری نیاز است. این کار، کار مورد نیاز برای ایجاد یک واحد سطح یعنی تنش سطحی را کاهش می دهد. توجه داشته باشید که وجود گروه آبدوست مانع از خروج کامل سورفکتانت از حلال به عنوان یک فاز جداگانه می شود، زیرا این امر مستلزم دهیدراته شدن گروه آبدوست است. بنابراین ساختار آمفیفیل سورفکتانت باعث می شود:

- افزایش غلظت سورفکتانت ها در سطح،
- کاهش تنش سطحی آب و
- جهت گیری مولکول در سطح با گروه آبدوست آن در فاز آبی و گروه آبگریز آن دور از فاز آبی.

۲-۲- نحوه تغییر تنش سطحی در جریان چند فازي ناشی از حضور سورفکتانت ها

یک سطح مشترک دوفاز هوا-آب یا روغن-آب با تنش سطحی اولیه σ_0 را در نظر بگیرید که به طور ناگهانی در معرض حضور سورفکتانت ها قرار می گیرد (شکل ۲) [۱]. اگر سورفکتانت ها زمان کافی برای جذب روی سطح مشترک داشته باشند و به تعادل برسند، تنش سطحی به مقدار تعادل خود یعنی σ_{eq} کاهش می یابد که کمتر از σ_0 است [۱ و ۱۱]. تنش سطحی تعادل σ_{eq} به غلظت حجمی سورفکتانت ها بستگی دارد. اگر آزمایش هایی برای تعیین تنش سطحی تعادل برای غلظت های مختلف سورفکتانت حجمی انجام شود، نموداری مشابه شکل ۳ به دست می آید. برای غلظت های حجمی کوچک سورفکتانت، تنش سطحی تعادل تقریباً مشابه تنش سطحی اولیه (تمیز) باقی می ماند. با افزایش غلظت حجمی سورفکتانت ها، تنش سطحی تعادل کاهش می یابد تا زمانی که به یک مقدار ثابت در یک

دیگر است. مولکول های داخل مایع از همه طرف به طور مساوی جذب می شوند، در حالی که مولکول های سطح تنها با نیروی جذب مولکول های داخلی حجم مایع مواجه می شوند (شکل ۱). این نیروی جاذبه در برابر هر نوع نیروی خارجی مقاومت می کند. مولکول های سطحی سیالات توسط مولکول های سیال مجاور می شوند که اگر سیال مجاور گاز باشد نیرو بسیار کمتر است و می توان آن را ناچیز در نظر گرفت. این مقاومت در برابر نیروی های خارجی و جذب مولکول های سطحی در سطح مشترک مایع با سیال دیگر همان مفهوم نیروی تنش سطحی است. عوامل موثر بر قدرت برهمکنش سطحی نیز باعث کاهش تنش سطحی مانند دما یا سورفکتانت ها می شود. بازی با تنش سطحی در سطح مشترک دوفاز ایده اصلی پشت همه کاربردهای سورفکتانت است. همانطور که در مقدمه عنوان شد، سورفکتانت ها ماهیتی دوگانه دارند و به همین دلیل به عنوان آمفیفیل شناخته می شوند. مولکول های سورفکتانت به دلیل ماهیت خود تمایل دارند به نقطه ای حرکت کنند و خود را به گونه ای جهت دهند که راحت باشند، یعنی در سطح مشترک (بین دو فاز)، سر آبدوست به سمت آب و دم آبگریز دور از آب قرار گیرد. قرار گرفتن مولکول های سورفکتانت در بین مولکول های سیال در سطح مشترک باعث کاهش جاذبه مولکولی رو به داخل می شود و در نتیجه تنش سطحی کاهش می یابد.

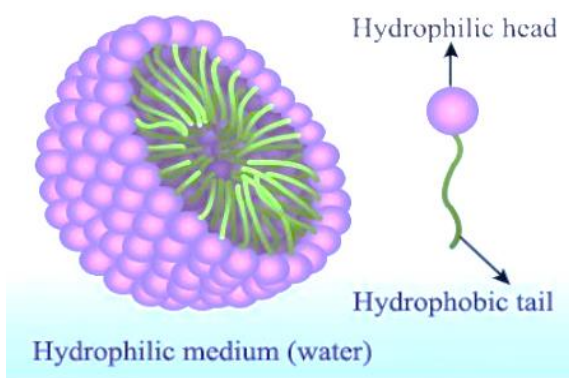


شکل ۱ نیروی جاذبه مولکولی در حجم و سطح مشترک سیال [۱۰]

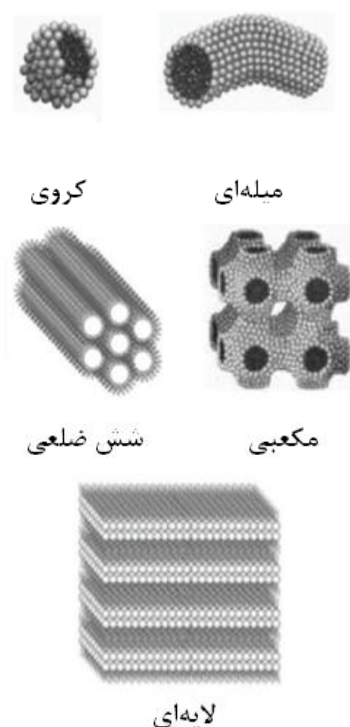
در دیدگاه دوم، انرژی آزاد سطحی حداقل مقدار کار مورد نیاز برای گسترش سطح مشترک است [۱ و ۶]. تنش سطحی یک مایع، انرژی آزاد سطحی در واحد سطح مرز بین مایع و هوای اطراف آن است. همچنین، این معیاری برای تفاوت ماهیت دو فازي است که در سطح مشترک (مرز بین هر دو فاز غیرقابل اختلاط) است. هر چه عدم تشابه در انرژی آزاد سطحی بیشتر باشد، تنش سطحی بیشتر است. هنگامی که یک سورفکتانت در یک محلول قطبی مانند محلول آبی حل می شود، وجود گروه آبگریز ممکن است با شکستن پیوندهای هیدروژنی بین مولکول

کاهش تنش سطحی کمک می کنند. تغییر خواص چندفازی مانند ترشوندگی و تشکیل کف توسط غلظت مونومرهای آزاد در محلول کنترل می شود. به طور کلی شکل میسل به ساختار سورفکتانت، معمولاً اندازه نسبی گروه سر و گروه دم بستگی دارد. ساختار یک میسل می تواند شکل های مختلفی مانند کروی، میله ای، دیسک و لایه ای داشته باشد (شکل ۵). در محلول غلیظ (غلظت بسیار بالاتر از CMC)، میسل های لایه ای تشکیل می شوند، به طوری که مولکول های فاز قطبی مانند محلول آبی منطقه بین صفحات موازی سورفکتانت را اشغال می کنند.

Micelle

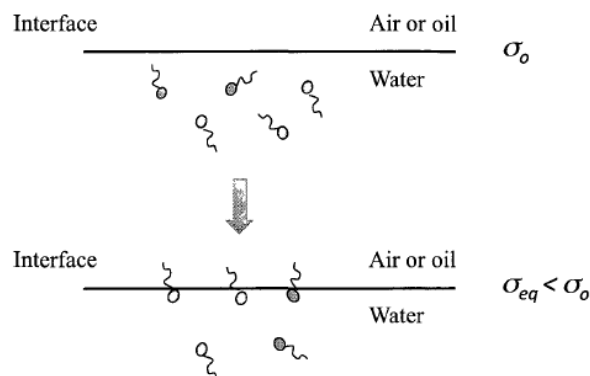


شکل ۴ تشکیل میسل در غلظت بالای سورفکتانت [۱۲]

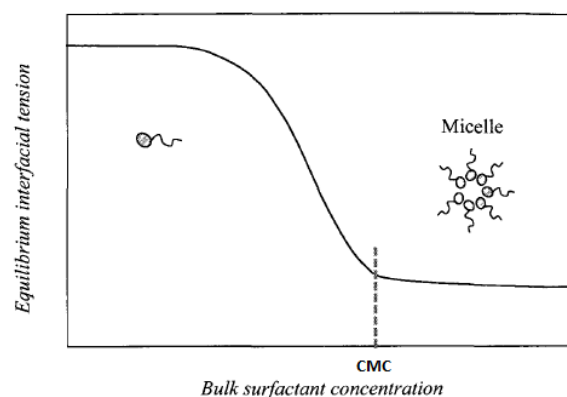


شکل ۵ انواع میسل در غلظت بالای سورفکتانت [۱۲]

غلظت بحرانی خاص که به عنوان غلظت بحرانی میسل^۱ شناخته می شود، کاهش می یابد. فراتر از CMC، سورفکتانت ها شروع به تجمع می کنند و میسل هایی را در داخل حجم محلول تشکیل می دهند که منجر به تنش سطحی تقریباً ثابت می شود [۱].



شکل ۲ شماتیک فرآیند کاهش تنش سطحی توسط سورفکتانت [۱]



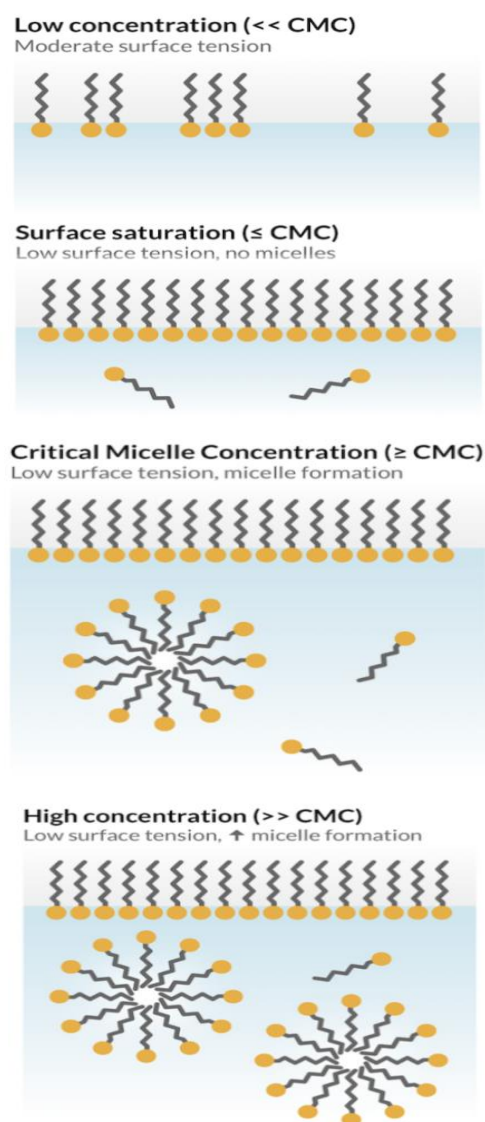
شکل ۳ روند کاهش تنش سطحی برحسب غلظت سورفکتانت [۱]

در یک میسل، سرهای قطبی در تماس با آب یک پوسته بیرونی تشکیل می دهند، در حالی که دم های غیرقطبی در داخل جدا می شوند [۱۲]. از این رو، هسته میسل از دم های بلند غیرقطبی تشکیل شده است. ساختار تشکیل میسل در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۲]. تشکیل میسل یک پدیده مهم است، زیرا مولکول های سورفکتانت بسته به اینکه در میسل ها وجود داشته باشند یا به صورت مونومر آزاد (تکی) رفتار بسیار متفاوتی دارند. میسل ها بر حلالیت هیدروکربن های آلی و روغن ها در محلول آبی تأثیر می گذارند و همچنین بر خاصیت مهمی به نام ویسکوزیته محلول تأثیر می گذارند. اندازه میسل با عدد تجمعی که تعداد مولکول های سورفکتانت مرتبط با یک میسل است اندازه گیری می شود. فقط مونومرهای سورفکتانت به

^۱ Critical Micelle Concentration (CMC)

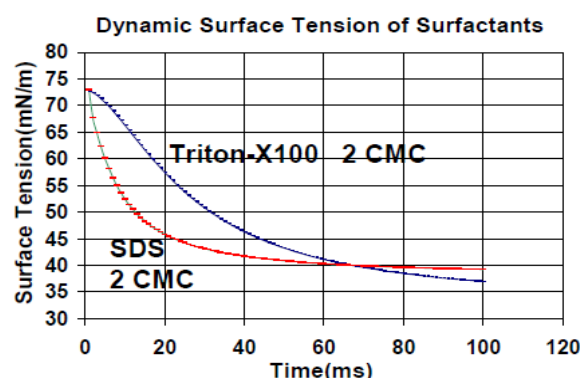
Surfactant Name	SDS	Triton X-100
Chemical formula	$C_{12}H_{25}SO_4$	$C_{14}H_{21}(OCH_2CH_2)_{9-10}OH$
Molecular wt.	288.3	624(Avg.)
Ethylene oxide groups	0	9-10
Appearance	White Powder	Clear Liquid
CMC	2500 wppm	200 wppm
Manufacturer	Fisher	Union Carbide
Equilibrium Surface Tension dyne/cm [$@ 2 \times CMC$]	38.0	33.1
Equilibrium Surface Tension dyne/cm [$@ 0.5 \times CMC$]	51.9	35.7

شکل ۷ مقادیر تنش سطحی برای دو سورفکتانت مختلف با دو غلظت مختلف [۳]



شکل ۸ رفتار مولکول های سورفکتانت [۱۴]

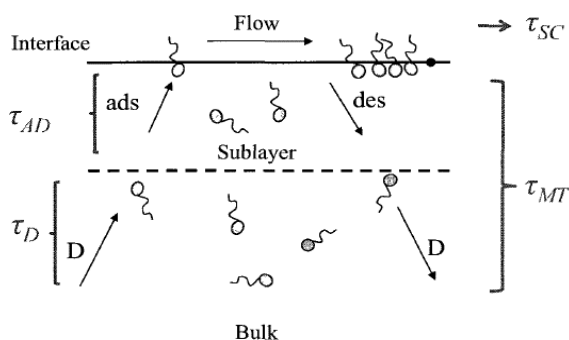
کاهش تنش سطحی به دلیل حضور سورفکتانت ها، تنش سطحی دینامیکی نامیده می شود [۱۳]. این یک پدیده وابسته به زمان است که در آن تغییر در تنش سطحی توسط تحرک مولکول های سورفکتانت پخش شده در سطح مشترک دوفاز ایجاد شده، سرعت جذب، غلظت حجمی و دینامیک میسلی کنترل می شود [۳]. بسیاری از این ویژگی ها به نوع سورفکتانت بکار برده شده بستگی دارد [۲]. بطور مثال در شکل ۶ نمودار کاهش تنش سطحی برای دو نوع سورفکتانت در جریان سیال دوفازی مشابه محلول آبی در حضور هوا با فرض غلظت از دو برابر CMC نشان داده شده است [۳]. همانطور که مشاهده می شود زمان رسیدن به غلظت تعادلی و میزان آن متفاوت است. همچنین مقادیر تنش تعادلی در حالت دو برابر CMC و نصف آن در شکل ۷ ذکر شده که نشان دهنده تفاوت اساسی در ویژگی های سورفکتانت ها برای کاهش تنش سطحی دارد [۳]. در شکل ۸ در صورت وجود زمان کافی برای جذب سورفکتانت ها در سطح مشترک نسبت به زمان اضافه شدن سورفکتانت ها به سیال، رفتار مولکول های سورفکتانت به سادگی به نمایش گذاشته شده است. مدل های فیزیکی اولیه تنش سطحی دینامیکی بر این فرض استوار بود که وابستگی زمانی تنش سطحی ناشی از انتقال مولکول ها در محلول حجمی به سطح مشترک یعنی توسط جذب است [۱۳]. از آن زمان، تحلیل های نظری زیادی از تنش سطحی دینامیکی در محلول های سورفکتانت منحصراً بر اساس ایده جذب، با موفقیت قابل توجهی انجام شده است. با این حال، نظریه جذب با زمان تکامل یافته و نیاز به رابطه دیگری بین غلظت سطحی مولکول های جاذب و غلظت توده ای مولکول ها در نزدیکی و سطح داشت. علاوه بر این، تنش سطحی دینامیکی به دست آمده توسط تئوری جذب شامل پارامترهای متعددی است که باید از قبل تعیین شوند و استفاده از آن برای اهداف مهندسی ساده نبود.



شکل ۶ روند کاهش تنش سطحی برای دو سورفکتانت مختلف [۳]

¹ Dynamic Surface Tension (DST)

زیرلایه سورفکتانت ها برابر با غلظت سورفکتانت حجم است (سورفکتانت نامحلول). در محدوده کنترل شده پخش، اگر τ_D $\tau_{AD} \ll$ باشد یک گرادیان غلظت سورفکتانت بین حجم سیال و زیر لایه وجود خواهد داشت (سورفکتانت محلول). در جدول ۱ خلاصه رفتار محلول یا نامحلول بودن سورفکتانت ها بطور خلاصه بر حسب مقایسه مقیاس های زمانی تعریف شده عنوان شده است. بسته به غلظت سورفکتانت و شرایط جریان، سیستم دو فازی همراه با سورفکتانت مشابه ممکن است رفتار متفاوتی داشته باشد [۱۶]. به طور مثال، اگر انتقال سورفکتانت به اندازه کافی سریع باشد، سطح هیچ رفتار ارتجاعی از خود نشان نمی دهد و یا اگر پدیده چندفازی به قدری سریع اتفاق بیافتد که سورفکتانت ها زمان کافی برای جذب در سطح مشترک را نداشته باشند، حضور سورفکتانت تاثیری در دینامیک مسئله ندارد.



شکل ۹ شماتیک مقیاس های زمانی و مکانی سورفکتانت ها در حجم سیال و سطح مشترک [۱]

جدول ۱ رفتار محلول یا نامحلول بودن سورفکتانت ها بر حسب مقایسه مقیاس های زمانی

$\tau_{MT} \ll \tau_{SC}$	$\tau_{MT} \gg \tau_{SC}$	$\tau_{SC} \sim \tau_{MT}$	
		$\tau_{AD} \gg \tau_D$	$\tau_{AD} \ll \tau_D$
محلول	نامحلول	نامحلول	محلول

۲-۴- تغییرات فیزیکی سطح مشترک دو فاز سیال در حضور سورفکتانت ها (تعادل نیروها و ایجاد نیروهای جدید)

غلظت سورفکتانت غیریکنواخت در امتداد یک سطح مشترک، نیروهای کپیلاری غیریکنواخت (عمودی) و مارانگونی^۲ (مماسی) را در سیال ایجاد می کند [۱۱ و ۱۷]. این به نوبه خود بر سرعت سیال تأثیر می گذارد که بطور متقابل روی توزیع سورفکتانت تأثیر می گذارد. به عنوان مثال، جابجایی سورفکتانت به سمت

۲-۳- فیزیک توزیع سورفکتانت ها در حجم سیال و سطح مشترک و جذب و دفع آن از سطح مشترک (محلول یا نامحلول بودن سورفکتانت)

یکی دیگر از ویژگی های مهم سورفکتانت ها حلالیت آنهاست [۸]. سورفکتانت های محلول می توانند هم در سطح مشترک و هم در قسمت حجم وجود داشته باشند. بنابراین، هنگامی که رفتار سورفکتانت مورد مطالعه قرار می گیرد، تبادل ثابت بین حجم سیال و سطح مشترک باید در نظر گرفته شود. در مورد سورفکتانت های نامحلول، سورفکتانت ها فقط در سطح مشترک وجود دارند. این رفتار را می توان یا توسط ماهیت سورفکتانت مشاهده کرد، یا زمانی که مقیاس های زمانی پخش و تبادل در مقایسه با تولید سطح مشترک بسیار کوچک است. در مورد دوم، سورفکتانت ها به طور موثر نامحلول عمل می کنند. در حالت نامحلول هیچ تبادل انبوه سورفکتانت ها بین سطح مشترک فازها و حجم سیال وجود ندارد.

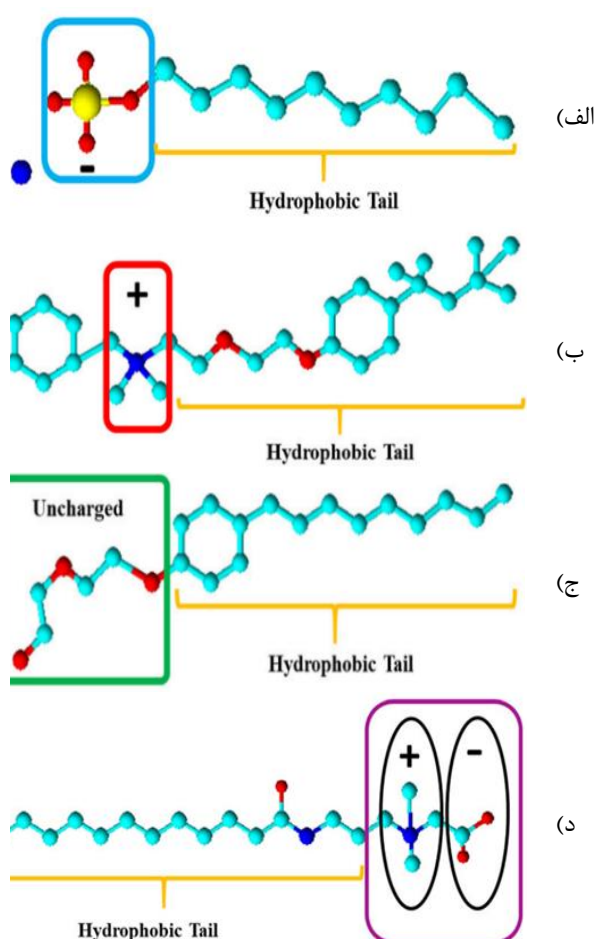
توزیع غیر یکنواخت سورفکتانت ها در سطح مشترک به مقیاس های زمانی نسبی پخش، همرفت و جذب-دفع در مسئله بستگی دارد [۸ و ۱۱ و ۱۵-۱۶]. علاوه بر اینکه سورفکتانت ها در امتداد سطح مشترک انتقال همرفتی و پخش دارند، توسط جذب-دفع و پخش بین سطح مشترک و حجم سیال منتقل می شوند [۱]. شکل ۹ شماتیکی از مقیاس های زمانی مختلف برای رفتار غیرتعادلی سورفکتانت ها در سطح مشترک با جریان سطحی را نشان می دهد. همرفت در فصل مشترک منجر به تجمع موضعی سورفکتانت ها در نقاط سکون می شود. مقیاس زمانی برای همرفت سطحی τ_{SC} به سرعت مماسی در مرز مشترک بستگی دارد. مقیاس زمانی انتقال جرم سورفکتانت ها بین مرز مشترک و حجم محلول τ_{MT} ، به مقیاس زمانی جذب و دفع سورفکتانت ها بین زیرلایه و مرز مشترک τ_{AD} و مقیاس زمانی پخش حجمی سورفکتانت ها بین حجم و زیرلایه (عمق تخلیه) τ_D بستگی دارد. اگر $\tau_{MT} \ll \tau_{SC}$ باشد، مرز مشترک خیلی سریع با سورفکتانت ها پر می شود تا کاهش یکنواخت تنش سطحی در امتداد مرز مشترک حاصل شود و در این حالت سورفکتانت ها محلول هستند. از طرف دیگر، اگر $\tau_{MT} \gg \tau_{SC}$ باشد، تقریباً هیچ تبادل سورفکتانت بین حجم سیال و مرز مشترک وجود ندارد و سورفکتانت ها اساساً نامحلول هستند. اگر $\tau_{SC} \sim \tau_{MT}$ باشد، مقدار نسبی τ_{AD} و τ_D رفتار سورفکتانت ها را تعیین می کند. به عنوان مثال، در محدوده جذب-دفع اگر $\tau_{AD} \gg \tau_D$ باشد غلظت

² Marangoni

¹ Debye Layer (Depletion Depth)

۳- انواع سورفکتانت ها

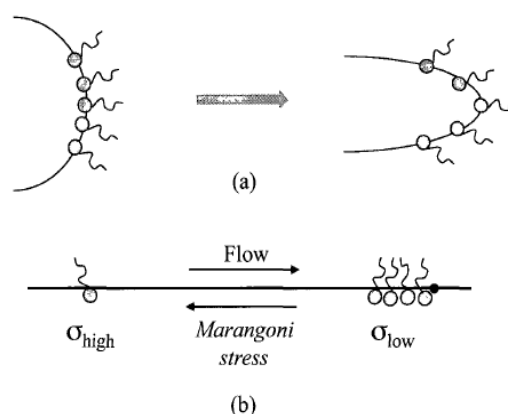
سورفکتانت ها براساس بار گروه سر قطبی (سر آبدوست) به عنوان آنیونی، کاتیونی، غیر یونی و زوئتریونی (آمفوتریک) طبقه بندی می شوند [۳ و ۸]. در دسته آنیونی و کاتیونی سر آبدوست به ترتیب دارای بار منفی و مثبت است. در دسته غیر یونی، سر آبدوست باردار نیست و برای زوئتریونی که در آن مناطق جداگانه ای از بار مثبت و منفی در سر آبدوست وجود دارد. در شکل ۱۱ نمونه ای از هر دسته به نمایش گذاشته شده است. بخش آبگریز معمولاً یک زنجیره آلکیل است که می تواند خطی یا منشعب باشد و طول آن معمولاً بین ۸ تا ۱۸ اتم کربن است. درجه انشعاب زنجیره، موقعیت گروه قطبی و طول زنجیره پارامترهای مهمی برای خواص فیزیکوشیمیایی سورفکتانت هستند [۸]. این تفاوت در خواص باعث می شود در بکارگیری سورفکتانت ها در کاربردهای مختلف انتخاب ها متفاوت باشد.



شکل ۱۱ انواع سورفکتانت ها، (الف) آنیونی (آمونیم لوریل سولفات)، (ب) کاتیونی (بنزونیم کلرید)، غیر یونی (اتوکسیلات نونیلفنول) و (د) زوئتریونی (لئورامیدوپروپیل بتاین) [۱۹]

نقاط سکون در نوک یک قطره تمایل به کاهش تنش سطحی در آنجا و افزایش تغییر شکل قطره دارد. از سوی دیگر، نیروهای مارانگونی در برابر همرفت سورفکتانت به سمت نوک قطره مقاومت می کنند و در نتیجه تغییر شکل قطره را مهار می کنند. فشرده کردن/تنش سطح مشترک منجر به افزایش/کاهش متناظر در غلظت سورفکتانت می شود.

پرش تنش عمودی در عرض سطح مشترک دوفاز از لحاظ ریاضی توسط حاصل ضرب تنش سطحی و انحنای متوسط مرز مشترک اعمال می شود، در حالی که جهش تنش مماسی در سطح مشترک توسط گرادیان تنش سطحی به دست می آید. سورفکتانت های جذب شده در سطح مشترک دوفاز، تعادل تنش را به دو صورت تغییر می دهند. اول، تجمع موضعی سورفکتانت ها در امتداد سطح مشترک، تنش سطحی را در آنجا کاهش می دهد. برای متعادل کردن تنش عمودی در سطح مشترک، سطح مشترک در این مناطق با تنش سطحی کم تغییر شکل می دهد تا انحنای بزرگ تری ایجاد کند، مانند آنچه که در شکل ۱۰ (a) مشاهده می شود [۱]. این پدیده بر تغییر شکل سطح مشترک قطره ها و حباب ها در حضور سورفکتانت ها تأثیر می گذارد که به نوبه خود بر تحرک آن تأثیر می گذارد. دوم، اگر یک توزیع غیر یکنواخت از سورفکتانت ها در طول مرز مشترک به دلیل یک نقطه رکود در جریان ایجاد شود، یک تنش سطحی غیر یکنواخت در امتداد مرز مشترک ایجاد می شود [۱ و ۱۸]. همانطور که در شکل ۱۰ (b) نشان داده شده است، یک گرادیان در تنش سطحی، تنش های مماسی اضافی را ایجاد می کند که به عنوان تنش های مارانگونی شناخته می شوند که سرعت مماسی مرز مشترک را کاهش می دهد. این اثر بر تحرک قطره ها و حباب ها در حضور سورفکتانت ها تأثیر می گذارد.



شکل ۱۰ شماتیک اثر توزیع غیریکنواخت سورفکتانت ها براساس، (a) تعادل تنش عمودی و (b) تعادل تنش مماسی [۱]

۳-۱- سورفکتانت های آنیونی

استفاده می شوند. بخش بزرگی از این سورفکتانت های غیر یونی با حضور یک زنجیره پلی اتیلن گلیکول، که از پلی تراکم اکسید اتیلن به دست می آید، آب دوست می شوند. سورفکتانت های غیر یونی احتمالاً آنهایی هستند که بیشتر در کاربردهای دارورسانی استفاده می شوند. سورفکتانت غیر یونی می تواند از استرهای پلی ال، استرهای پلی اکسی اتیلن و پولوکسامرها یا پلورونیک ها باشد. استرهای پلی اکسی اتیلن عمده شامل پلی اتیلن گلیکول هستند. متداول ترین سورفکتانت های غیر یونی مورد استفاده، اترهای الکل چرب هستند. سورفکتانت های غیر یونی به سختی کمتر سیستم سورفکتانت کمک می کنند [۳ و ۱۲]. نمونه از سورفکتانت غیر یونی در شکل ۱۱ ج نشان داده شده است.

۳-۴- سورفکتانت های زوئتریونی

سورفکتانت های زوئتریونی که به عنوان سورفکتانت های آمفوتریک نیز شناخته می شوند، دارای مراکز کاتیونی و آنیونی هستند که به یک مولکول متصل هستند. سورفکتانت های زوئتریونی کمتر از سورفکتانت های آنیونی، کاتیونی و غیر یونی رایج هستند. این سورفکتانت ها بسیار ملایم هستند و به ویژه برای استفاده در محصولات مراقبت شخصی و پاک کننده های خانگی مناسب هستند. آنها با تمام کلاس های دیگر سورفکتانت ها سازگار هستند و در حضور غلظت های بالای الکترولیت ها، اسیدها و قلیاها محلول و موثر هستند. این سورفکتانت ها ممکن است حاوی دو گروه باردار با علائم متفاوت باشند. در حالی که بار مثبت تقریباً همیشه آمونیوم است، منبع بار منفی ممکن است متفاوت باشد (کربوکسیلات، سولفات، سولفونات). این سورفکتانت ها دارای خواص پوستی عالی هستند. آنها اغلب در شامپوها و سایر محصولات آرایشی و بهداشتی و همچنین در مایعات ظرفشویی دستی به دلیل خاصیت کف کنندگی زیاد استفاده می شوند. نمونه بارز سورفکتانت زوئتریونی لئورامیدوپروپیل بتائین و لسیتین است که در شکل ۱۱ د نشان داده شده است [۳ و ۱۲].

۴- کاربرد سورفکتانت ها

سورفکتانت ها معمولاً در شکل گیری محصولات استفاده می شوند. به دلیل تطبیق پذیری سورفکتانت ها را در محصولات متنوعی مانند روغن موتور، محصولات دارویی، شوینده های لباسشویی و سایر محصولات تمیز کننده خانه، گل حفاری و مواد

سورفکتانت های آنیونی پس از انحلال در آب باعث ایجاد یک یون سورفکتانت با بار منفی می شوند [۳ و ۱۲]. این ماده پرکاربردترین نوع سورفکتانت برای شستشو، مایعات ظرفشویی و شامپوها به دلیل خاصیت پاک کنندگی عالی است. بیشتر سورفکتانت های آنیونی یون های کربوکسیلات، سولفات و سولفونات هستند. متداول ترین سورفکتانت های آنیونی آلکیل سولفات ها، آلکیل اتوکسیلات سولفات ها و صابون ها هستند. سورفکتانت های آنیونی نسبتاً غیر سمی هستند. زنجیره مستقیم یک گروه آلیفاتیک C12-C18 اشباع/غیراشباع است. پتانسیل حلالیت در آب سورفکتانت با وجود پیوندهای دوگانه در آن تعیین می شود. در محلول، سر دارای بار منفی است. سورفکتانت به ویژه در دور نگه داشتن کثیفی از پارچه ها و از بین بردن باقی مانده های نرم کننده پارچه از پارچه ها خوب است [۱۲]. شکل ۱۱ الف ساختار سورفکتانت آنیونی، سدیم دودسیل سولفات را نشان می دهد.

۳-۲- سورفکتانت های کاتیونی

سورفکتانت های کاتیونی در محلول، سر دارای بار مثبت است. آنها عوامل امولسیون کننده خوبی هستند. این سورفکتانت ها همچنین باکتری کش های خوبی هستند و برخی به عنوان ضد عفونی کننده موضعی استفاده می شوند. خواص میکروب کشی آنها باعث می شود که آنها به ویژه در ضد عفونی کننده های دستشویی و حمام مفید باشند. سورفکتانت های کاتیونی به سایت های دارای بار منفی جذب می شوند. آنها می توانند به این مکان ها متصل شوند و پارچه را با احساس نرم و راحت ارائه دهند. به همین دلیل اغلب به عنوان نرم کننده پارچه استفاده می شود [۳ و ۱۲]. نمونه مناسبی از سورفکتانت کاتیونی در شکل ۱۱ ب نشان داده شده است.

۳-۳- سورفکتانت های غیر یونی

این نوع سورفکتانت ها که در محلول های آبی یونیزه نمی شوند و به دلیل گروه آبدوست خود، از نوع غیر قابل تفکیک هستند، مانند الکل، فنل، اتر، استر یا آمید. این سورفکتانت ها بار الکتریکی ندارند که باعث می شود در برابر غیرفعال شدن سختی آب مقاوم باشند. آنها چربی زدای عالی هستند که در محصولات لباسشویی، پاک کننده های خانگی و مایعات ظرفشویی دستی

شناور مورد استفاده در غنی سازی سنگ معدن بسیار مفید هستند [۲]. سورفکتانت بخش ضروری از زندگی روزمره هستند. فرآیندهای مختلف خانگی و تجاری، مانند تمیز کردن، مرطوب کردن، امولسیون کردن و اهداف مختلف دیگر، نیاز به استفاده از فعل و انفعال سیال، چه با سیال و چه با مواد جامد دارند. سورفکتانت ها همچنین بخش مهمی از ریه های انسان هستند که به فرآیند تنفس کمک می کنند. سورفکتانت ها در جایی معرفی می شوند که سیالات متقابل باید رفتار خاصی از نظر تنش سطحی، قابلیت مرطوب شدن و غیره داشته باشند تا بتوانند یک کار خاص را انجام دهند. این ترکیبات خواص مکانیکی را تغییر می دهند و برای سهولت فرآیند اضافه می شوند [۱۰].

سورفکتانت ها تقریباً در تمامی فیزیک های مربوط به جریان چندفازی نقش داشته اند و از این رو از موضوعات جالب برای محققان است. سورفکتانت ها بر ضخامت لایه در جریان های پوششی^۱، پراکندگی امواج سطحی^۲، دینامیک و ضخامت لایه نازک سیال پخش شده^۳ و طول عمر حباب ها، فوم ها و امولسیون ها تأثیر می گذارند [۲ و ۲۱-۲۰]. در دهه های اخیر، کاربردهای سورفکتانت ها به حوزه های با فناوری بالا مانند چاپ الکترونیک، بیوتکنولوژی، میکروالکترونیک و تحقیقات ویروسی گسترش یافته است [۲ و ۸]. مطالعات قبلی به تأثیر سورفکتانت ها در طیف وسیعی از هندسه های جریان مختلف، از جمله تغییر شکل قطره ای، پل ها و رشته های مایع^۴، باریکه های سیال^۵، تشکیل رشته های مکرر^۶، جریان های لایه نازک^۷ و دینامیک قطع شدن جت های پیوسته^۸ پرداخته اند [۲]. کار اخیر بر روی شکست رشته های مایع توسط مطالعات اخیر، اهمیت سورفکتانت ها را در رفتار شکستگی به ویژه در اطراف ناحیه گلوگاه^۹ شکستگی نشان داد. با این حال، علی رغم برخی شباهت ها، ویژگی های خاصی از تشکیل قطره در چاپ جوهر افشان در حالت قطره تحت کنترل وجود دارد که این مسئله را کاملاً از مواردی که قبلاً در نظر گرفته شده بود متمایز می کند [۸]. اول، مقیاس های طولی و زمانی کاملاً متفاوت هستند. فرآیند چاپ جوهر افشان به ترتیب با مقیاس های طولی و زمانی میکرومتر و میکروثانیه مشخص می شود. در نتیجه، انتقال سورفکتانت تحت تأثیر سرعت سطح و اصلاح آن توسط تنش های مارانگونی قرار می گیرد که اثرات پخش در سطح^{۱۰} و تبادل حجمی^{۱۱} سورفکتانت برای چاپ جوهر افشان ناچیز است. دوم، اکثر مطالعات قبلی از شرایط اولیه

یک رشته یا قطره یکنواخت پوشیده شده شروع می شوند که در آن غلظت سطح زمان کافی برای متعادل شدن داشته است، در حالی که در چاپ جوهر افشان تولید سریع سطح جدید منجر به توزیع سورفکتانت می شود که فاصله زیادی با تعادل دارد [۲]. به طور خاص، مطالعات کمی برای اثرات سورفکتانت ها بر ادغام قطرات توضیح داده اند و این علی رغم این واقعیت که سورفکتانت ها در طبیعت همه جانبه هستند و حذف آنها در محیط های تجربی دشوار است [۲۲]. پدیده برخورد قطرات بر بسترهای جامد بیش از یک قرن به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. فرآیندی که در بسیاری از کاربردهای صنعتی از جمله پوشش اسپری، رسوب دهی، چاپ جوهر افشان، خنک کننده اسپری، هضم باران در توربین های گاز، اسپری محصول، یخ زدن هواپیما استفاده می شود [۳ و ۱۳]. تغییر شکل ناشی از تنش سطحی و شکستن یک قطره کشیده یا نخ مایع معلق در یک سیال لزج با استفاده از سورفکتانت ها یک رویداد مهم در بسیاری از فرآیندهای سیال از جمله تشکیل امولسیون، اختلاط در سیستم های سیال چند فازی، پوشش دهی، و چاپ جوهر افشان است [۱۶ و ۲۳]. عمل سورفکتانت ها دینامیک سطح مشترک را با پیامدهای مهمی بر رفتار کلی جریان چند فازی تغییر می دهد. به عنوان مثال، آنها می توانند به شدت بر تعداد قطرات یا حباب هایی که در یک مخلوط تشکیل می شوند، رفتار امواج سطح مشترک، اتمیزه کردن، ادغام و پدیده های فروپاشی تأثیر بگذارند. همه این پدیده ها تأثیر زیادی بر نتیجه تعدادی از کاربرد های صنعتی و زیست محیطی دارند [۵]. جریان حبابی نقش مهمی در انواع کاربردهای فنی مانند راکتورهای ستون حبابی، فرآیندهای شناور سازی یا تصفیه فاضلاب دارد. در این برنامه ها، عوامل فعال سطحی، به اصطلاح سورفکتانت ها، وجود دارند. سورفکتانت ها یا یکی از عوارض جانبی آلودگی هستند یا عمداً برای تأثیر گذاری بر تعامل بین فازها اضافه می شوند [۲۴].

میکرو سیالیک^{۱۲} مطالعه سیالات در مقیاس میکروسکوپی است. این یک حوزه مطالعاتی با طیف وسیعی از کاربردها، مانند تحویل دارو، تراشه های تشخیصی و میکرو راکتورها است [۱۶ و ۲۵]. قطرات در سیستم های میکرو سیال در دنیای واقعی نسبت سطح به حجم زیادی دارند که نیروهای سطحی را مهم می کند. تغییر شکل یک قطره در یک جریان برشی ساده در تعدادی از سیستم های جاری صنعتی و بیولوژیکی اهمیت اساسی دارد [۱۷]

⁷ Thin Film Flows

⁸ Pinch-off Dynamics of Continuous Jets

⁹ Neck Region

¹ Surface Diffusion

¹ Bulk Exchange

¹ Microfluidic

¹ Coating Flows

² Dispersion of Surface Waves

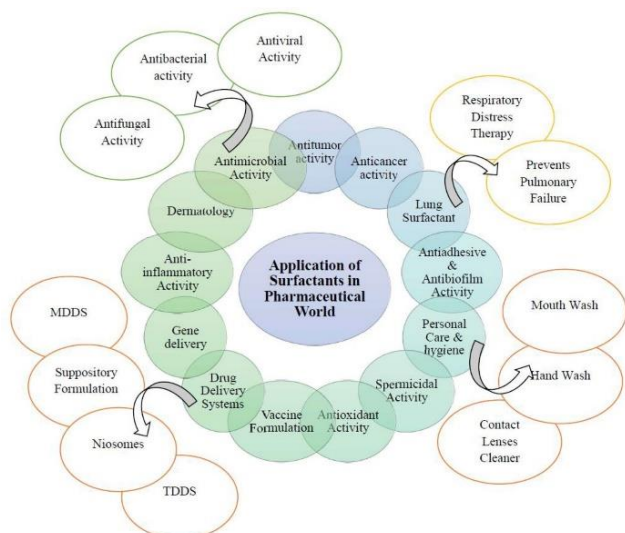
³ Dynamics and Thicknesses of Spreading Films

⁴ Liquid Bridges and Threads

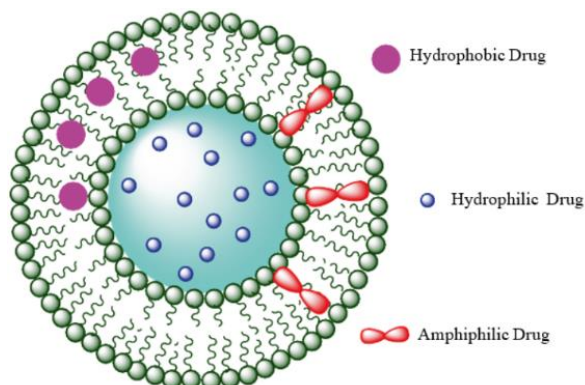
⁵ Filaments

⁶ Repeated Thread Formation

در مناطق با خاصیت مشابه در مسیل ها جذب شوند. این بدان معنی است که ذرات دارویی آبدوست در هسته مسیل که از محلول آبی تشکیل شده جذب می شود. ذرات دارویی با خاصیت آبگریز در قسمت دم های آبگریز سورفکتانت های تشکیل دهنده مسیل و ذرات دارای خاصیت دوگانه در بین دو سری از سورفکتانت ها جذب می شوند. به این ترتیب، به راحتی این ذرات دارویی همراه با حرکت سیال منتقل می شوند.



شکل ۱۲ کاربرد سورفکتانت ها در پزشکی و داروسازی [۲۹]



شکل ۱۳ کاربرد سورفکتانت ها در داروسازی [۲۹]

کاربرد دیگر پزشکی سورفکتانت ها در واکسن سازی است. سورفکتانت های خاصی تحت عنوان QS-21 استخراج می شوند که هم پاسخ های ایمنی با واسطه سلولی و هم آنتی بادی را افزایش می دهد و به عنوان یک کمکی در واکسن های زیر واحد برای درمان بیماری های جدی مانند HIV-1، ویروس هرپس سیمپلکس، ریو ویروس، پلاسمودیوم فالسیپاروم، مالاریا، ملانوم و غیره استفاده می شود. اخیراً شرکت نوواواکس از این QS-21

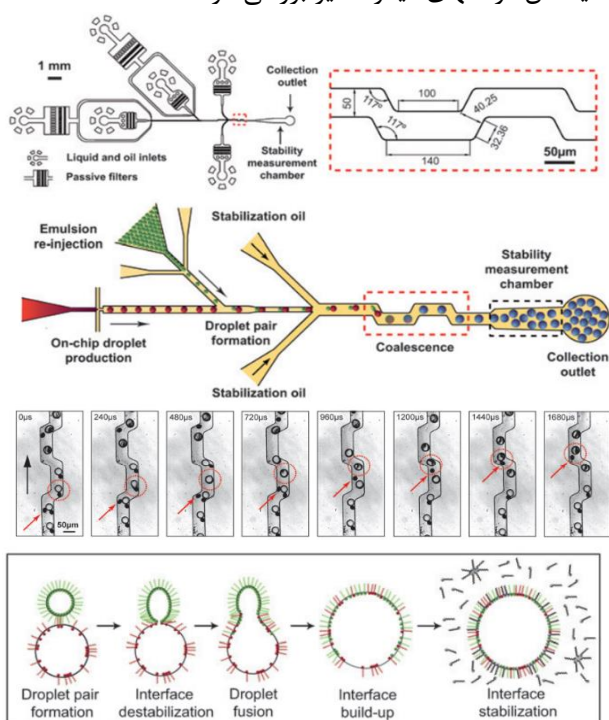
و [۲۶]. کاربردهای احتمالی شامل تشکیل و رئولوژی امولسیون ها، دستگاه های امولسیون کننده، ترکیب پلیمری، بازیابی نفت و مطالعه گلبول های قرمز و غیره خواهد بود [۲۶-۲۷]. مطالعاتی نشان می دهد که حتی سورفکتانت ها در پیش بینی وضع آب و هوا و شرایط جوی می تواند نقش اساسی داشته باشد [۲۸]. در ادامه، جهت آشنایی با نحوه عملکرد سورفکتانت ها به برخی از کاربرد های مهم با جزئیات و فیزیک مربوطه تشریح خواهد شد.

۴-۱- کاربرد های پزشکی و دارویی

ویژگی ها و توانایی های منحصر به فرد فوق العاده، این سورفکتانت ها را به کاندیدای بالقوه ای برای طیف وسیعی از کاربردها در زمینه های مختلف زیست پزشکی مانند پوست، دارورسانی، درمان ضد سرطان، درمان سورفکتانت، فرمولاسیون واکسن، محصولات مراقبت بهداشت شخصی و بسیاری موارد دیگر تبدیل می کند [۲۹]. آنها به طور عمده عمدتاً به عنوان یک جزء فعال امولسیون استفاده می شوند و به عنوان تثبیت کننده عمل می کنند. خاصیت خودآرایی سورفکتانت ها یک عملکرد بسیار قدرتمند برای سیستم های دارورسانی است. اکثر محصولات دارویی حالیت آبی ضعیفی از خود نشان می دهند و از این نظر، سورفکتانت ها برای تأثیرگذاری بر حالیت محصولات اجتناب ناپذیر هستند. در نوشیدنی های دارویی، سورفکتانت ها برای حل شدن ویتامین D، E، سایر مواد دارویی و سایر ترکیبات روغن ضروری استفاده می شوند. سورفکتانت ها در فرمولاسیون پمادها و همچنین در مورد کرم ها، روان کننده ها و ژل ها مفید هستند. همچنین، آنها برای افزایش میزان جذب دارو و نفوذ دارو استفاده می شوند. علاوه بر آن، سورفکتانت ها نیز برای تثبیت فرمولاسیون های نیمه جامد استفاده می شوند [۲۹]. در طول دهه ها، بسیاری از محققان فعالیت های ضد میکروبی، ضد چسب، آنتی بیوفیلیم، ضد التهابی و آنتی اکسیدانی سورفکتانت ها را با توجه به کاربرد آن در اهداف دارویی گزارش کرده اند. شکل ۱۲ خلاصه ای از مهمترین کاربردهای پزشکی سورفکتانت ها به نمایش گذاشته شده است.

در حوزه دارورسانی از خاصیت تشکیل مسیل ها در بالاتر از غلظت بحرانی (CMC) سورفکتانت ها استفاده می شود. همانطور که در شکل ۱۳ مشخص است، ذرات دارویی با سه خاصیت آبدوست، آبگریز و دوگانه آبدوست-آبگریز تولید می شوند. هر یک از این خاصیت ها باعث می شود که ذرات دارویی

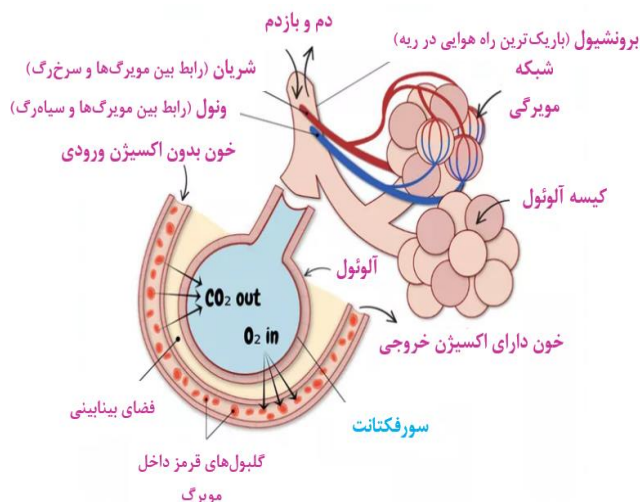
پزشکی [۳۲] و امولسیون سازی با قطرات دو یا چند جزئی که در صنایع غذایی، داروسازی و لوازم آرایشی [۳۳] استفاده می شود. قطرات حاصل از این فرآیند می توان برای آزمایش های شیمیایی برای ساخت ترکیبات شیمیایی جدید یا تجزیه و تحلیل نتایج برخی از روش ها استفاده کرد. نمونه ای از همجوشی قطرات در شکل ۱۵ نشان داده شده است. پس از ایجاد قطرات با استفاده از اتصالات T شکل یا دستگاه های متمرکز کننده جریان یا هر وسیله مناسب دیگری با سورفکتانت در مرزهای آنها، می توان این قطرات را در مسیرهای میکرو حرکت داد. قطرات مواد شیمیایی مختلف که دارای سورفکتانت جذب شده در مرز خود هستند، می توانند در مسیرهای میکرو پشت سر هم حرکت کنند (سورفکتانت جذب شده در سطح مشترک دلیل حرکت جداگانه آنها است). هنگامی که این قطرات وارد یک محفظه آغازگر آزمایشی گسترده تر در بین مسیرهای باریک می شوند، در ورود مجدد به مسیر باریک، قطره جلویی با انسداد مواجه می شود و بنابراین قبل از ورود مجدد با قطرات دیگر مواد شیمیایی که از عقب می آیند، ترکیب می شود و در نتیجه همجوشی را ممکن می سازد. دلیل اصلی ترکیب شدن قطرات وجود سورفکتانت ها است که تنش سطحی هر دو قطره را کاهش داده و از طرفی سر آبدوست آنها در هر دوسال قطرات قابل حل است. این قطره نهایی با یک ترکیب جدید را می توان از نظر ماهیت آن در انتهای دیگر مسیر بررسی کرد.



شکل ۱۵ فرآیند همجوشی قطرات با استفاده از سورفکتانت ها [۳۴]

به عنوان کمکی برای فرمولاسیون واکسن کووید-۱۹ (کورونا) استفاده می کند [۲۹].

علاوه بر کاربردهای پزشکی که تا به حال اشاره شد، سورفکتانت ها بصورت طبیعی در بدن ما تولید و استفاده می شوند که مهم ترین آن سورفکتانت های تولید شده در سیستم تنفسی است. آلوئول ها جایی هستند که ریه ها و خون در طی فرآیند دم و بازدم، اکسیژن و دی اکسید کربن را تبادل می کنند. ریه های انسان دارای ۳۰۰ میلیون حباب مانند آلوئول است که منطقه اصلی تبادل گاز را تشکیل می دهد [۱۰]. این آلوئول ها با لایه مایع نازک پوشیده شده اند تا از سطوح سلولی ظریف خود محافظت کنند. بنابراین آلوئول ها را می توان به عنوان کیسه های پر از هوا که با آب پوشانده شده اند به تصویر کشید (شکل ۱۴). این یک سطح مشترک آب و گاز در تمام آلوئول ها ایجاد می کند. سورفکتانت هایی که به طور طبیعی در ریه ها وجود دارند، تنش سطحی را کاهش می دهند. این سورفکتانت ها به عنوان سورفکتانت ریوی شناخته می شوند که در واقع یک کمپلکس لیپوپروتئین فعال سطحی (فسفولیپوپروتئین) است که دائماً توسط سلول های آلوئولی موجود در دیواره آلوئول ایجاد می شود. با توجه به عملکرد سورفکتانت ها در کاهش تنش سطحی، وجود آنها ریه را قادر می سازد تا سطح آلوئولی بزرگی را که برای تبادل گاز کارآمد ضروری است، حفظ کند.



شکل ۱۴ نقش سورفکتانت ها در سیستم تنفسی انسان [۳۰]

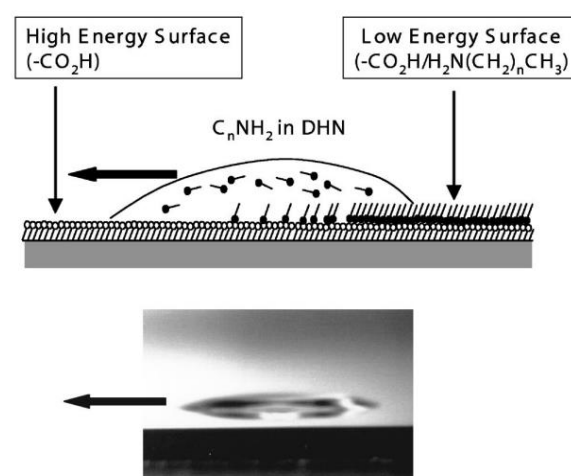
۴-۲- همجوشی قطره ای

همجوشی قطرات دارای سورفکتانت در بسیاری از کاربردها از جمله میکرو راکتورها [۳۱]، تولید ترکیبات و انجام آزمایش های

¹ Alveoli

۴-۳- حرکت قطره ای خودپیشران

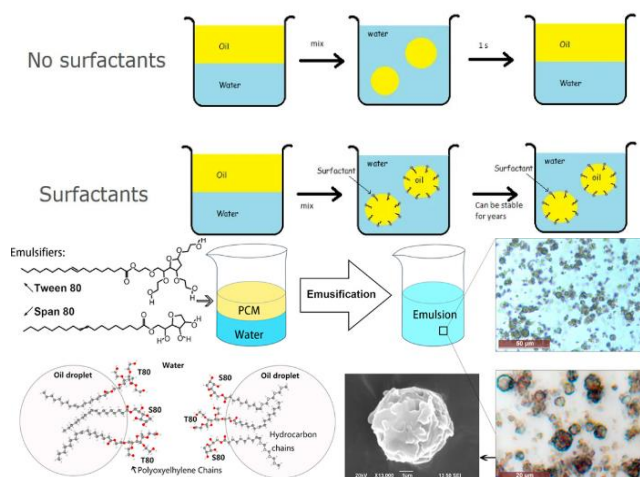
سورفکتانت ها را می توان در دستگاه های میکروسیال برای حرکت قطره ای خودپیشران استفاده کرد [۱۰]. با پوشاندن یک لایه نازک از ترکیب با سر آنیونی در مسیری که قطرات باید از آنجا حرکت کنند، وقتی قطره ای با یک سورفکتانت دارای قطبیت کاتیونی رها می شود، سرهای کاتیونی سعی می کنند خود را روی سرهای آنیونی بچسبانند و از این رو یک گرادیان انرژی تولید می کنند که قطره را به جلو می راند. شکل ۱۶ این فیزیک را نشان می دهد.



شکل ۱۶ حرکت قطره ای خودپیشران با استفاده از سورفکتانت ها [۳۵]

۴-۴- تثبیت کننده امولسیون ها

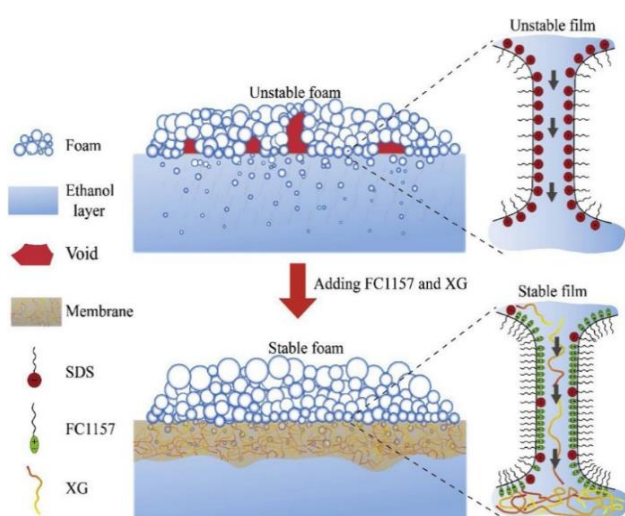
امولسیون مخلوطی از دو یا چند مایع غیرقابل اختلاط است. امولسیون ها در تعدادی از محصولات روزانه مورد استفاده قرار می گیرند. می توان مثال هایی مانند سس مایونز، کرم های سالاد، وینگرت، سس ها را در صنایع غذایی ارائه کرد. در داروها و لوازم آرایشی به صورت کرم، پماد، روغن کبد ماهی و همچنین در فرآورده های روانکاری مورد استفاده هستند [۲۷ و ۳۶]. سورفکتانت ها در پایداری این امولسیون ها استفاده می شوند. قطرات موجود در امولسیون می توانند به طور نامطلوب به هم پیوند بخورند یا شکسته شوند. سورفکتانت ها جذب شده در مرز قطرات به منظور محافظت از این رویداد نامطلوب استفاده می شود. اکنون وقتی قطرات با سورفکتانت در مرزهای خود نزدیک می شوند، یکدیگر را دفع می کنند و از این رو اندازه و ساختار قطرات را حفظ می کنند. شکل ۱۷ این فرآیند را به نمایش گذاشته است.



شکل ۱۷ پایداری سازی امولسیون ها با استفاده از سورفکتانت ها [۳۷-۳۸]

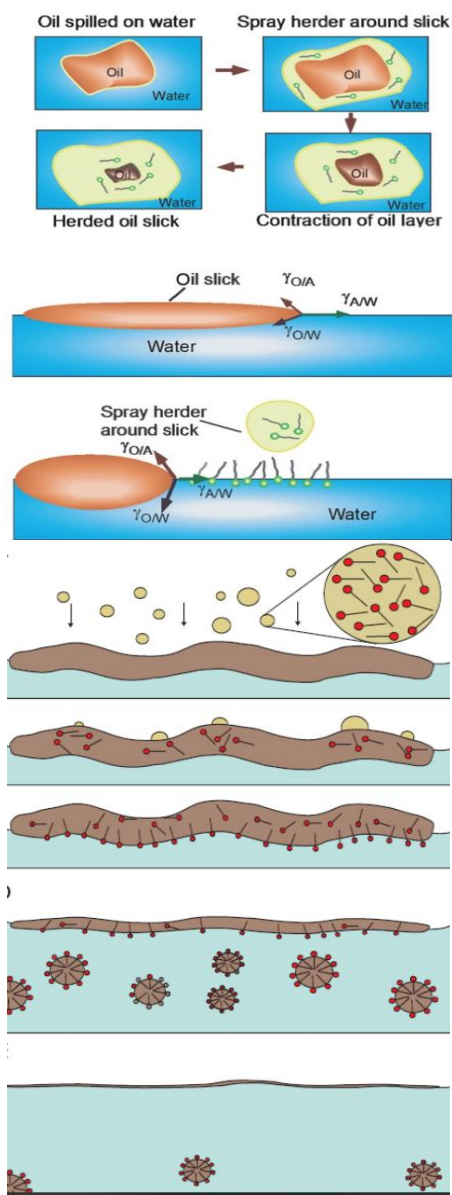
۴-۵- فوم های آتش نشانی

فوم ها مخلوطی از گاز با روغن یا آب هستند که در آن گاز به صورت پراکنده در مایع وجود دارد. سورفکتانت های استفاده شده پایداری کف را افزایش می دهند و همچنین به خاموش کردن آتش کمک می کنند. سورفکتانت های موجود در داخل فوم ها، مولکول های گاز را در بین آنها به دام می اندازند. عملکرد فوم های آتش نشانی از طریق خفه کردن آتش، جلوگیری از مخلوط شدن هوا با بخارات قابل اشتعال، جدا کردن شعله ها از سطح سوخت و خنک کردن سوخت و سطح آن است. البته برای افزایش پایداری این ترکیب از پلیمر های افزودنی به همراه سورفکتانت ها استفاده می شود [۱۰]. شکل ۱۸ فیزیک این مسئله را به نمایش گذاشته است.



شکل ۱۸ پایداری سازی فوم های آتش نشانی با استفاده از سورفکتانت ها [۳۹]

۴-۶- پاکسازی آلودگی لکه های نفتی ناشی در دریا

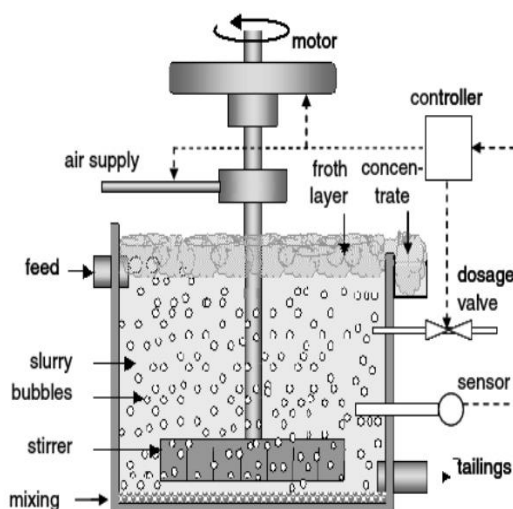


شکل ۱۹ مکانیزیم از بین بردن لکه های نفتی با استفاده از سورفکتانت ها [۴۰-۴۱]

نشت نفت در دریا معمولاً ناشی از تخلیه از کشتی های در حال حرکت، پالایشگاه ها و پایانه های نفتی و غیره است. این نشت ها تهدیدی برای محیط زیست دریاها هستند. برای حذف آن، محلول سورفکتانت با استفاده از هواپیما یا کشتی در دو حالت اضافه می شوند. حالت اول به محیط اطراف لکه نفتی و به آب دریا اضافه می شوند [۴۰]. یک گرادیان تنش سطحی ایجاد می شود. این گرادیان تنش سطحی در واقع ترشوندگی محیط آبی اطراف لکه را زیاد کرده و این اتفاق نفت را مجبور می کند تا در مرکز لکه متراکم و از گسترش آن جلوگیری شود، بنابراین کار حذف روغن آسان تر می شود. تا جای ممکن این لکه متراکم نفت را با استفاده از تجهیزات مختلف از سطح دریا جمع آوری و خارج می کنند. در حالت دوم، سورفکتانت ها در امتداد لکه نفت اضافه می شود [۴۱]. به دلیل اضافه شدن سورفکتانت ها و کاهش تنش سطحی لکه نفتی به قطرات ریزتر تبدیل می شوند. پراکندگی قطرات کوچک در یک حجم آب آسان تر است و قطرات کوچک ممکن است به راحتی توسط میکروب های موجود در آب تجزیه شوند. شکل ۱۹ هر دو مکانیزیم از بین بردن لکه های نفتی را به نمایش گذاشته است.

۴-۷- استخراج مواد معدنی

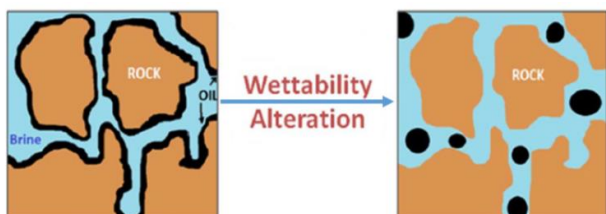
نمونه معروف جریان حبابدار تحت تأثیر سورفکتانت شناورسازی کف است که برای اولین بار در فرآوری مواد معدنی برای جداسازی مواد آبریز و آبدوست ایجاد شد. سنگ معدن خام خرد شده و در آب حل می شود تا دوغاب تشکیل شود [۲۴] و [۴۲]. سپس از یک سورفکتانت برای آبریز کردن مواد معدنی مورد نظر استفاده می شود. دوغاب به یک ستون حباب به اصطلاح سلول شناورسازی که هوادهی می شود، منتقل می شود. ذرات آبریز به حباب هایی می چسبند که به سطح سلول شناورسازی می رسند و در آنجا کف ایجاد می کنند که می توان آن را استخراج کرد. امروزه از شناورسازی کف در بازیافت کاغذ و تصفیه فاضلاب نیز استفاده می شود [۲۴]. شکل ۲۰ شماتیک یک سلول فلوئاسیون و تأثیر سورفکتانت ها را بر یک ازدحام حباب نشان می دهد.



شکل ۲۰ استخراج مواد معدنی با استفاده از سورفکتانت ها [۲۴]

۴-۸- بازیابی بهبود یافته نفت

علاوه بر نفت در حالت عادی، بخش قابل توجهی از ذخایر نفتی جهان را ماسه های نفتی و قیر تشکیل می دهند، مانند ذخایر آلبرتای کانادا. برای باز کردن قفل این ذخایر، از روش های بخار درجا استفاده شده است. با این حال، چنین روش هایی از انتشار گازهای گلخانه ای فراوان موانع عملیاتی پرخطر، هزینه های سرمایه بالا و آثار زیست محیطی رنج می برند. این مسائل استفاده از تزریق بخار را برای بهبود بازیافت شن های نفتی و قیر محدود می کند. از این رو، نیاز فوری به توسعه نوع جدیدی از فناوری برای مقابله با این مسائل در بازیافت ماسه های نفتی و قیر وجود دارد. در میان گزینه های مختلف موجود، سورفکتانت ها راه حل های بالقوه ای برای بهبود عملکرد بازیابی با تغییر ویژگی های فیزیکوشیمیایی ماسه های نفتی و قیر هستند. بسیاری از سوالات اساسی مانند نحوه تعامل سورفکتانت ها با قیر در شرایط فشار و دمای بالا و نحوه رفتار امولسیون روغن در دمای بالا بی پاسخ باقی مانده است. این چالش های جدید باید قبل از استفاده از سورفکتانت ها به عنوان یک افزودنی مؤثر به بخار، به درستی مورد توجه قرار گیرند [۴۶].



شکل ۲۱ بازیابی بهبود یافته نفت با استفاده از سورفکتانت ها [۴۷]

۴-۹- ریزراکتورها

راکتورهای کف یکپارچه^۳ و راکتورهای با سایز میلیمتری^۴ به دلیل مزایایی مانند مساحت سطح بزرگ، نرخ انتقال جرم بالا، افت فشار کم و سهولت افزایش مقیاس نسبت به فناوری راکتور معمولی، علاقه تحقیقاتی زیادی را در صنعت و دانشگاه به دست آورده اند. راکتور کف یکپارچه شامل جریان دو فاز و یک کاتالیزور یکپارچه است. جریان درون کانال های یکپارچه متشکل از قطارهای حباب های گاز و اسلاگ های مایع، با تشکیل یک کف دو فازی در محفظه ای چسبیده زیر کانال یکپارچه تولید می شود. برای بهبود راندمان این نوع راکتورها، نیاز به درک رابطه بین نرخ انتقال جرم و سایر پارامترهای مهم است. برای سیستم های دو فازی گاز-مایع، یکی از عوامل اصلی که هم بر

نفت در قرن گذشته منبع اصلی انرژی بوده و بوده است و اقتصاد در مقیاس جهانی هنوز تا حد زیادی به آن وابسته است [۴۳]. پس از تکنیک های بهره برداری سنتی، که شامل مکانیسم های طبیعی (بازیابی اولیه)^۱ و سیلابی (بازیابی ثانویه)^۲ می شود، تا یک سوم تا ۵۰ درصد از نفت اصلی در محل ممکن است از میدان نفتی استخراج شود [۱۰ و ۴۳]. تکنیک های تولید اضافی، یا فرآیندهای بهبود یافته بازیابی نفت، نفت باقی مانده را که هنوز به دام افتاده است، هدف قرار می دهند [۴۳]. سورفکتانت ها به مخزن (سنگ بستر) وارد می شوند که دو عملکرد را انجام می دهند که تنش سطحی را کاهش و قابلیت ترشوندگی را تغییر می دهند، که بازیابی نفت باقی مانده را ممکن می سازد [۱۰]. مکانیسم های اصلی جریان یافتن نفت از طریق سورفکتانت عبارتند از کاهش تنش سطح، تغییر ترشوندگی سنگ مخزن، و افزایش ویسکوزیته سیال جابجایی از طریق تشکیل میکروامولسیون. در مورد اول، نیروهای کپیلاری به دلیل وجود دو یا چند سیال غیرقابل اختلاط در منافذ سنگ وجود دارد. این نیروهای کپیلاری باعث می شود مقدار زیادی نفت در مناطق پر آب مخزن باقی بماند. کاهش تنش سطحی بین آب و نفت، این نفت باقیمانده به دام افتاده بخاطر نیروی کپیلاری را با کاهش نیروهای کپیلاری بازیابی می کند [۴۴]. مورد دوم، ترشوندگی توزیع سیالات را در مخزن کنترل می کند. اعتقاد بر این است که مکانیسم اصلی افزایش بازیابی نفت در سنگ کربنات ها با استفاده از سورفکتانت ها، تغییر ترشوندگی است. برای شرایط مخلوط آبگریز (یا روغن دوست)، سنگ مخزن ترجیحاً نفت را می خورد و نفت در ماتریس سنگ مخزن به دام می افتد. سورفکتانت ها می توانند ترشوندگی سنگ را به حالت آبدوست تغییر دهند. معمولاً اعتقاد بر این است که افزایش بازیافت نفت زمانی اتفاق می افتد که سنگ بیشتر در آب خیس شود. این به این دلیل است که آب به درون ماتریکس سنگ نفوذ می کند و نفت را جابجا می کند، که منجر به کاهش اشباع باقیمانده نفت و بهبود بازیافت نفت می شود (شکل ۲۱) [۴۴]. در مورد سوم، میکروامولسیون ها به عنوان مخلوط های ترمودینامیکی پایدار و نسبتاً شفاف از نفت، آب و سورفکتانت تعریف می شوند که برای بازیابی بهبود یافته نفت شیمیایی بسیار مهم هستند. میکروامولسیون ها قادر به کاهش نیروهای مویرگی از طریق ایجاد تنش سطحی بسیار کم بین نفت و آب هستند که منجر به بازیابی بیشتر اشباع روغن باقیمانده به دام افتاده در مویرگی می شود [۴۴-۴۵].

³ Monolith Froth Reactors

⁴ Millimeter-Sized Reactors

¹ Natural Driven Mechanisms (Primary Recovery)

² Water Flooding (Secondary Recovery)

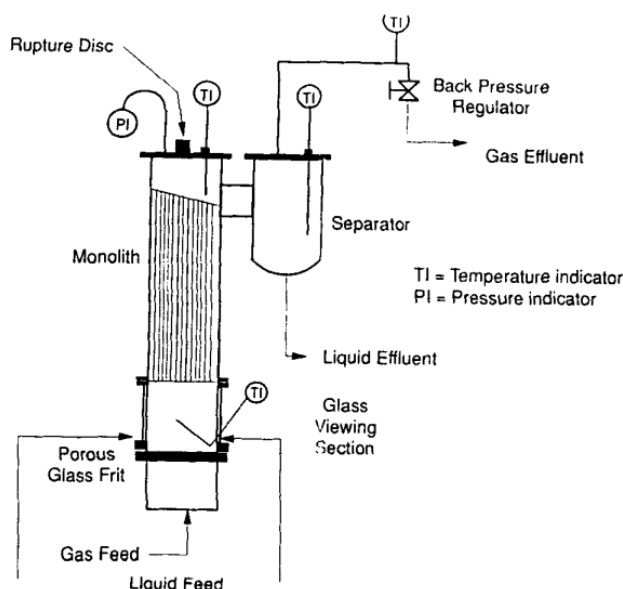
۵- نتیجه گیری

در این مقاله مواد فعال سطحی (سورفکتانت ها) و تأثیر آن بر جریان سیالات چندفازی مطالعه شد. نحوه عملکرد سورفکتانت ها و تأثیر حضور آنها در سطح مشترک دوفاز به عوامل مختلفی مانند محلول یا نامحلول بودن سورفکتانت ها با تعریفی خاص بستگی دارد. همچنین، انواع سورفکتانت ها از روی بار الکتریکی سر آبدوست قابل دسته بندی بوده و خواص آنها فرق می کند. سورفکتانت ها در کاربردهای مهم صنعتی و زندگی روزمره وجود دارند. با توجه به دامنه وسیع این کاربردها، سورفکتانت ها به عنوان یکی از عوامل موثر بر جریان چند فازی نیاز به مطالعه روزافزون دارد. شناخت بهتر این مواد می تواند در دستکاری و بهینه سازی کاربردهای شامل جریان سیال چندفازی بسیار مفید باشد.

۶- مراجع

- [1] Cui, Y., A computational fluid dynamics study of two-phase flows in the presence of surfactants, *University of New Hampshire*, Durham, England, (2011).
- [2] Antonopoulou, E., Harlen, O. G., Rump, M., Segers, T., and Walkley, M. A., Effect of surfactants on jet break-up in drop-on-demand inkjet printing, *Physics of Fluids*, Vol. 33, No. 7, pp. 072112, (2021).
- [3] Sanjeev, A., Jog, M. A., and Manglik, R. M., Computational simulation of surfactant-induced interfacial modification of droplet impact and heat transfer, in *ILASS Americas, 21st Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Orlando, FL, May 18-21, USA, (2008).
- [4] Teng, C.-H., Chern, I.-L., and Lai, M.-C., Simulating binary fluid-surfactant dynamics by a phase field model, *Discrete and Continuous Dynamical Systems-B*, Vol. 17, No. 4, pp. 1289-1307, (2012).
- [5] Soligo, G., Roccon, A., and Soldatia, A., Coalescence of surfactant-laden drops by Phase Field Method, *Journal of Computational Physics*, Vol. 376, pp. 1292-1311, (2019).
- [6] Goodarzi, F. and Zendejboudi, S., Effects of salt and surfactant on interfacial characteristics of water/Oil systems: Molecular dynamic simulations and Dissipative Particle Dynamics, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 58, pp. 8817-8834, (2019).

هیدرودینامیک و هم بر سرعت انتقال جرم فازها تأثیر بسزایی دارد، وجود عوامل فعال سطحی (سورفکتانت ها) است. سورفکتانت ها در فصل مشترک گاز و مایع جذب می شوند و تنش سطحی را کاهش می دهند [۷]. شکل ۲۲ شماتیک یک ریز راکتور را نشان می دهد.



شکل ۲۲ شماتیک یک ریز راکتور [۷]

۴-۱۰- قطرات فوق پخش شونده

کنترل ترشوندگی بسترهای جامد توسط قطرات آبی، با توجه به بسیاری از کاربردهای جالب مانند فناوری پوشش، بهبود بازیافت نفت، دارورسانی، آفت کش ها و علف کش ها مورد نیاز هستند [۹]. فوق پخش شونده^۱ گسترش غیرمنتظره سریع و کامل قطرات آبی مملو از سورفکتانت بر روی بسترهای آبگریز است، پدیده ای که در دهه های گذشته توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده است [۴۷]. سورفکتانت مسئول این پدیده هستند گیرند و با کاهش تنش سطحی بین محلول اسپری و سطح هدف به پخش محلول ها مانند آفت کش ها کمک می کنند. در شکل ۲۳ یک قطره قبل و بعد از اضافه کردن سورفکتانت های فوق پخش کننده مشاهده می شود.



شکل ۲۳ قرارگیری یک قطره روی سطح قبل و بعد از اضافه کردن سورفکتانت های فوق پخش کننده [۴۸]

¹ Superspreading

- [18] Herrada, M.A., Ponce-Torres, A., Rubio, M., Eggers, J., and Montanero, J.M., Stability and tip streaming of a surfactant-loaded drop in an extensional flow. Influence of surface viscosity, *J. Fluid Mech.*, Vol. 934, pp. A26, (2022).
- [19] Badmus, S. O., Amusa, H. K., Oyehan, T. A., and Saleh, T. A., Environmental risks and toxicity of surfactants: overview of analysis, assessment, and remediation techniques, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 28, No. 44, pp. 62085–62104, (2021).
- [20] Bazhlekoy, I., Numerical simulation of drop coalescence in the presence of film soluble surfactant, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1487, pp. 351-359, (2012).
- [21] Hayashi, K., Motoki, Y., van der Linden, M. J. A., Deen, N. G., Hosokawa, S., and Tomiyama, A., Single contaminated drops falling through stagnant liquid at low Reynolds Numbers, *Fluids*, Vol. 7, No. 2, pp. 55-78, (2021).
- [22] Martin, D. W. and Blanchette, F., Simulations of surfactant effects on the dynamics of coalescing drops and bubbles, *Physics of Fluids*, Vol. 27, pp. 012103, (2015).
- [23] Young, Y.-N., Booty, M. R., Siegel, M., and Li, J., Influence of surfactant solubility on the deformation and breakup of a bubble or capillary jet in a viscous fluid, *Physics of Fluids*, Vol. 21, pp. 072105, (2009).
- [24] Steinhausen, M., Numerical simulation of single rising bubbles influenced by soluble surfactant in the spherical and ellipsoidal regime, *M.Sc. Thesis, Departement of Mathematics Mathematical Modelling and Analysis, Technical University Darmstadt*, Darmstadt, Germany, (2018).
- [25] Palssona, S., Siegel, M., and Tornberg, A.-K., Simulation and validation of surfactant-laden drops in two-dimensional Stokes flow, *Journal of Computational Physics*, Vol. 386, pp. 218-247, (2019).
- [26] Soligo, G., Roccon, A., and Soldati, A., Deformation of clean and surfactant-laden droplets in shear flow, *Meccanica*, Vol. 55, pp. 371–386, (2020).
- [27] Urbina-Villalba, G., An algorithm for emulsion stability simulations: Account of flocculation, coalescence, surfactant adsorption and the process of ostwald ripening, *Int. J. Mol. Sci.*, Vol. 10, pp. 761–804, (2009).
- [28] Prisle, N. L., Asmi, A., Topping, D., Partanen, A.-I., Romakkaniemi, S., Dal Maso, M., Kulmala, M., Laaksonen, A., Lehtinen, K. E. J., McFiggans, G., and Kokkola, H., Surfactant effects in global simulations
- [7] Haghnegahdar, M., Boden, S., and Hampel, S., Investigation of surfactant effect on the bubble shape and mass transfer in a milli-channel using high-resolution microfocus X-ray imaging, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 87, pp. 184-196, (2016).
- [8] Antonopoulou, E., The role of surfactants in jet break-up for inkjet printing, *PhD Thesis, Woodhouse, Leeds, United Kingdom*, (2020).
- [9] Theodorakis, P. E., Müller, E. A., Craster, R. V., and Matar, O. K., Modelling the superspreading of surfactant-laden droplets with computer simulation, *Soft Matter*, Vol. 11, pp. 9254-9261, (2015).
- [10] Tariq, A., Phase-Field simulation of surfactant adsorption onto flat and droplet interfaces, *M.Sc. Thesis, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China*, (2012).
- [11] Yulianti, K., Gunawan, A. Y., Soewono, E., and Mucharam, L., Effects of an insoluble surfactant on the deformation of a falling drop towards a solid surface, *Journal of Computer Science & Computational Mathematics*, Vol. 3, No. 1, pp. 7-12, (2013).
- [12] Davea, N. and Joshi, T., A concise review on surfactants and its significance, *International Journal of Applied Chemistry*, Vol. 13, No. 3, pp. 663-672, (2017).
- [13] Hasegawa, T., Karasawa, M., and Narumi, T., Modeling and measurement of the dynamic surface tension of surfactant solutions, *J. Fluids Eng.*, Vol. 130, No. 8, pp. 081505, (2008).
- [14] Ahmed, E., Breaking Down Surfactants: What they are, how they work, and their role in the pandemic, *dispersa.ca*, Sep. 25, (2020): <https://www.dispersa.ca/blog/what-are-surfactants-and-how-do-they-work/>.
- [15] Mukherjee, S., Berghout, P., and Van den Akker, H. E. A., A lattice boltzmann approach to surfactant-laden emulsions, *American Institute of Chemical Engineers Journals*, Vol. 65, No. 2, pp. 811-828, (2019).
- [16] Jin, F., Gupta, N. R., and Stebe, K. J., The detachment of a viscous drop in a viscous solution in the presence of a soluble surfactant, *Physics of Fluids*, Vol. 18, pp. 022103, (2006).
- [17] Xu, J.-J., Li, Z., Lowengrub, J., and Zhao, H., A level-set method for interfacial flows with surfactant, *Journal of Computational Physics*, Vol. 212, pp 590-616, (2006).

- [39] Yu, X., Jiang, N., Miao, X., Zong, R., Sheng, Y., Li, C., and Lu, S., Formation of stable aqueous foams on the ethanol layer: Synergistic stabilization of fluorosurfactant and polymers, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 591, pp. 124545, (2020).
- [40] Gupta, D. Sarker, B., Thadikaran, K., John, V., Maldarelli, C., and John, G., Sacrificial amphiphiles: Eco-friendly chemical herders as oil spill mitigation chemicals, *Science Advances*, Vol. 1, No. 5, pp. e1400265., (2015).
- [41] Kjeilen-Eilertsen, G., Jersak, J. M., and Westerlund, S., Developing Treatment Products for Increased Microbial Degradation of Petroleum Oil Spills across Open-Water Surfaces, *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, USA, 7–9 Feb. (2011).
- [42] Lai, M. -C., Tseng, Y. -H., and Huang, H., Numerical simulation of moving contact lines with surfactant by immersed boundary method, *Commun. Comput. Phys.*, Vol. 8, No. 4, pp. 735-757 (2010).
- [43] Druetta, P. and Picchioni, F., Simulation of surfactant oil recovery processes and the role of phase behaviour parameters, *Energies*, Vol. 12, pp. 983-1013, (2019).
- [44] Adila, A. S., Al-Shalabi, E. W., and Alameri, W., Geochemical investigation of hybrid Surfactant and low salinity/engineered water injections in carbonates: A numerical study, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 208, pp. 109367, (2022).
- [45] Sabirgalieva, N., Skartlien, R., and Rojas-Solorzano, L., DPD simulation of surface wettability alteration by added water-soluble surfactant in the presence of indigenous oil-soluble surfactant, *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 57, pp. 1489-1494, (2022).
- [46] Ahmadi, M., and Chen, Z., Spotlight onto surfactant–steam–bitumen interfacial behavior via molecular dynamics simulation, *Scientific Reports*, Vol. 11, pp. 19660, (2021).
- [47] Shah, R. and Calderon, J., Developments in green surfactants for enhanced oil recovery march, aocs.org, Mar. 10, (2021): <https://www.aocs.org/stay-informed/inform-magazine/featured-articles/developments-in-green-surfactants-for-enhanced-oil-recovery-march-2021?SSO=True>.
- [48] Theodorakis, P. E., Smith, E. R., Craster, R.V., Müller, E. A., and Matar, O. K., Molecular dynamics simulation of the superspreading of surfactant-laden droplets. A review, *Fluids*, Vol. 4, No. 176, pp. 1-23, (2019).
- of cloud droplet activation, *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, pp. L05802, (2012).
- [29] Das, B., Kumar, B., Begum, W., Bhattarai, A., Mondal, M. H., and Saha, B., Comprehensive review on applications of surfactants in vaccine formulation, therapeutic and cosmetic pharmacy and prevention of pulmonary failure due to covid-19, *Chemistry Africa*, Vol. 5, pp. 459–480, (2022).
- [30] Ahmed, E., Alveoil gas exchange, medizzy.com, Aug. 20, (2022), Available: <https://medizzy.com/feed/5115715>.
- [31] Hao, Y., Jin, N., Wang, Q., Zhou, Y., Zhao, Y., Zhang, X., and Lü, H., Dynamics and controllability of droplet fusion under gas–liquid–liquid three-phase flow in a microfluidic reactor, *RSC Adv.*, Vol. 10, pp. 14322-14330, (2020).
- [32] Gao, G., Chen, F.-J., Zhou, L., Su, L., Xu, D., Xu, L., and Li, P., Control of lipid droplet fusion and growth by CIDE family proteins, *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular and Cell Biology of Lipids*, Vol. 1862, No. 10, pp. 1197-1204, (2017).
- [33] Whitby, C. P. and Bahuon, F., Droplet fusion in oil-in-water pickering emulsions, *Front. Chem.*, Vol. 6, pp. 213-227, (2018).
- [34] Mazutis, L., Bareta, J. -C., and Griffiths, A. D., A fast and efficient microfluidic system for highly selective one-to-one droplet fusion, *Lab Chip*, Vol. 9, pp. 2665-2672, (2009).
- [35] Lee, S. -W., Kwok, D. Y., and Laibinis, P. E., Chemical influences on adsorption-mediated self-propelled drop movement, *Phys. Rev. E*, Vol. 65, pp. 051602, (2002).
- [36] Posocco, P., Perazzo, A., Preziosi, V., Laurini, E., Priola, S., and Guido, S., Interfacial tension of oil/water emulsions with mixed non-ionic surfactants: comparison between experiments and molecular simulations, *RSC Adv.*, Vol. 6, pp. 4723-4729, (2016).
- [37] Zhang, X., Wu, J. -y., and Niu, J., PCM-in-water emulsion for solar thermal applications: The effects of emulsifiers and emulsification conditions on thermal performance, stability and rheology characteristics, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 147, pp. 211-224, (2016).
- [38] Laurén, S., Evaluation of emulsion stability by interfacial rheology measurements, biolinscientific.com, Nov. 10, (2020): <https://www.biolinscientific.com/blog/evaluation-of-emulsion-stability-by-interfacial-rheology-measurements>.

<https://inthefurrow.com/2021/04/21/adjuvants-surfactants/>.

[49] CHS Agronomy, Get to know adjuvants: Surfactants, inthefurrow.com, Apr. 21, (2021):



بررسی و شبیه سازی انتقال حرارت در میله سوخت داغ قلب راکتور هسته ای

فرزاد چوبدار رحیم

دانشجوی دکتری، دانشکده
مهندسی مکانیک، دانشگاه
صنعتی ارومیه، ارومیه

محمد باقر

محمد صادقی آزاد*

دانشیار، دانشکده مهندسی
مکانیک، دانشگاه شهید مدنی
آذربایجان، تبریز

چکیده: در این مقاله به بررسی انتقال حرارت در میله سوخت داغ استوانه ای شکل قلب راکتور هسته ای تحت فشار مانند راکتور بوشهر پرداخته شده است. به طور کلی در آنالیز حرارتی یک میله سوخت، توجه ویژه به توزیع درجه حرارت در اجزاء تشکیل دهنده میله سوخت و همچنین تأثیر جریان سیال اطراف آن بر میزان برداشت حرارت معطوف می گردد. لذا در این مطالعه با استفاده از معادلات انتقال حرارت در سوخت و سیال مجاور آن، میزان شدت انتقال حرارت و تأثیر پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. برای این شبیه سازی از دو نرم افزار انسیس فلوئنت (CFD) و کد هسته ای COBRA-EN استفاده شده است، در این مدل سازی از مدل EPRI کد COBRA-EN به دلیل محافظه کارانه بودن آن برای محاسبه شار حرارتی بحرانی و حداکثر و متوسط دمای سوخت، آنتالپی، دمای خنک کننده، دبی جرمی خنک کننده استفاده شده است و نتایج آن با نتایج CFD و نتایج مرجع مقایسه گردیده است. همچنین پارامترهای ترموهیدرولیکی گاز هلیوم تحت فشار محبوس در بین سوخت و غلاف میله سوخت نیز بررسی گردیده است.

واژه های راهنما: راکتورهای قدرت هسته ای، میله سوخت داغ، ترموهیدرولیک، انتقال حرارت، تک کانال، CFD و COBRA-EN

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۸

Farzad Choobdar Rahim
PhD Student,
Department of
Mechanical Engineering,
Urmia University of
Technology, Urmia

Mohammad Bagher Mohammad Sadeghi Azad*
Associate Professor,
Department of
Mechanical
Engineering, Azarbaijan
Shahid Madani
University,
Tabriz

Investigation of heat transfer in the hot fuel rod of the nuclear power reactor

Abstract: In this paper, the heat transfer in the hot fuel rod of a pressurized nuclear reactor such as the Bushehr reactor has been investigated. Generally, in the thermal analysis of a nuclear fuel rod, special attention is paid to the temperature distribution in the constituent parts of the fuel rod, as well as the effect of the coolant flow around it on the amount of heat removal. Therefore, in this study, using the equations of heat transfer in the fuel rod and its adjacent coolant, the intensity of heat transfer and the effect of different parameters have been investigated. For this simulation, Ansys-Fluent (CFD) software and the nuclear code COBRA-EN have been used, in this modeling the EPRI model of the COBRA-EN code is used because of its conservativeness to calculate the critical heat flux and the maximum and average fuel temperature, enthalpy, temperature Coolant, mass flow rate of coolant has been used and its results have been compared with CFD results and reference results. Also, the thermo-hydraulic parameters of helium gas under pressure trapped between the fuel and clad have also been investigated.

Keywords: Nuclear power reactors, Hot fuel rod, Thermo hydraulic, Heat transfer, Single channel, CFD, COBRA-EN.

۱- مقدمه

بررسی پدیده های انتقال حرارت، تجزیه و تحلیل شار حرارتی و میدان دما یکی از مهمترین موضوعات در مهندسی است که کاربردهای زیادی در دستگاه های مختلف مانند کلکتورهای خورشیدی، موتورهای احتراق داخلی و راکتورهای هسته ای دارد [۵-۱]. ارزیابی عملکرد نیروگاه های هسته ای (NPP) در شرایط حادثه موضوع اصلی تحقیقات در بخش هسته ای در ۴۰ سال گذشته بوده است [۶]. از زمان ساخت و بهره برداری اولین نسل های راکتورهای هسته ای تا کنون موضوع نحوه انتقال حرارت و برداشت حرارت از میله های سوخت موجود در قلب این راکتورها مورد توجه محققین بوده است. میله های سوخت نیروگاه های هسته ای علاوه بر اینکه هم منبع تولید حرارت از طریق شکافت هسته ای در بخش قرص سوخت اورانیوم و انتقال انرژی از طریق لایه هلیوم و غلاف به سیال خنک کننده در قلب راکتور می باشند، همچنین به عنوان اولین سپر برای محافظت ماده رادیواکتیو تولید شده در اثر شکافت هسته ای از سوخت اورانیوم برای جلوگیری از نشت مواد رادیواکتیو به محیط عمل می کنند. بنابراین در نیروگاه های هسته ای هر حادثه ای رخ بدهد تا زمانی که میله های سوخت ذوب نشوند آن حادثه قابل کنترل می باشد. تری مایل آیلند، چرنوبیل و فوکوشیما حوادث معروفی هستند که در آنها سناریوهای حادثه ذوب قلب راکتور اتفاق افتاد [۷-۱۰]. در اینگونه حوادث، ذوب شدن میله های سوخت، باعث نشت ماده رادیواکتیو در سیال خنک کننده می شود. همچنین ممکن است در اثر واکنش زیرکونیوم و آب انفجار هیدروژنی رخ بدهد. دلیل ذوب میله سوخت این است که حرارت تولید شده توسط قرص های سوخت به اندازه کافی توسط سیستم های خنک کننده راکتور برداشت نمی شوند در نتیجه دمای میله سوخت افزایش می یابد و از نقطه ذوب آن فراتر می رود و حادثه ذوب اتفاق می افتد [۱۱-۱۴]. در کل بررسی انتقال حرارت در میله های سوخت هسته ای از موضوعات مهم در طراحی نیروگاه های هسته ای می باشد.

در این زمینه نیز پژوهش های مختلفی انجام شده است، از جمله فقیهی و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۱۵] آنالیز ترموهیدرولیکی مجتمع سوخت داغ قلب راکتور بوشهر را در حالت پایا با کد COBRA-EN بررسی کرده اند، و ماکزیمم و متوسط دمای سوخت، دمای سطح داخلی و خارجی غلاف و تغییرات دما، فشار و چگالی در کانال داغ را محاسبه کردند. صادقی آزاد و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۶] آنالیز ترموهیدرولیکی مجتمع سوخت داغ راکتور نیروگاه بوشهر را به صورت زیرکانال در حالت گذرا زمانی

که یکی از پمپ های مدار اول از کار می افتد بررسی کرده اند و تغییرات دمای میله سوخت داغ برحسب زمان گزارش کرده اند. صفایی و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۱۷] تجزیه و تحلیل ترموهیدرولیکی یک قلب راکتور VVER-1000 در حالت پایدار، با استفاده از کد اصلاح شده COBRA-EN ارائه دادند، توزیع توان مورد نیاز توسط کدهای WIMS-D4 و CITATION براساس محاسبات نوترونیک محاسبه شد. حداکثر و متوسط دمای سوخت، آنتالپی، دما و چگالی مایع خنک کننده، سرعت جریان جرمی خنک کننده و افت فشار با استفاده از مدل EPRI محاسبه کردند و نتایج بدست آمده را با رویکردهای تحلیلی و FSAR [۱۸] راکتور بوشهر مقایسه کردند. پاتریک زدلر و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۹] شرایط ترموهیدرولیک در یک موکاپ مجتمع سوخت هسته ای را با در نظر گرفتن تأثیر جریان هوای افقی بالای مجتمع میله های سوخت مورد مطالعه قرار دادند. در سناریوی مورد مطالعه، مکانیسم های اصلی انتقال حرارت رسانش، همرفت و تابش باهم کوپل شدند. بررسی مدل به صورت تجربی و شبیه سازی CFD برای تجزیه و تحلیل فرآیندهای انتقال حرارت نتایج مطلوبی ارائه دادند. امی تاو تیکادار و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۲۰] مطالعات عددی بر روی انتقال حرارت و افت فشار در یک میله سوخت هسته ای شبیه سازی شده با زبری سطح سه بعدی انجام دادند. شبیه سازی های عددی دو بعدی با استفاده از مدل آشفته SST برای ارزیابی انتقال حرارت و افت فشار بر روی بخش صاف و ناهموار میله داغ انجام شد. نتایج عددی با داده های تجربی به دست آمده برای یک المنت حرارتی که به عنوان یک میله سوخت اینکونل-نیکل در راکتور آب تحت فشار (PWR) شبیه سازی شده بود، مقایسه گردید.

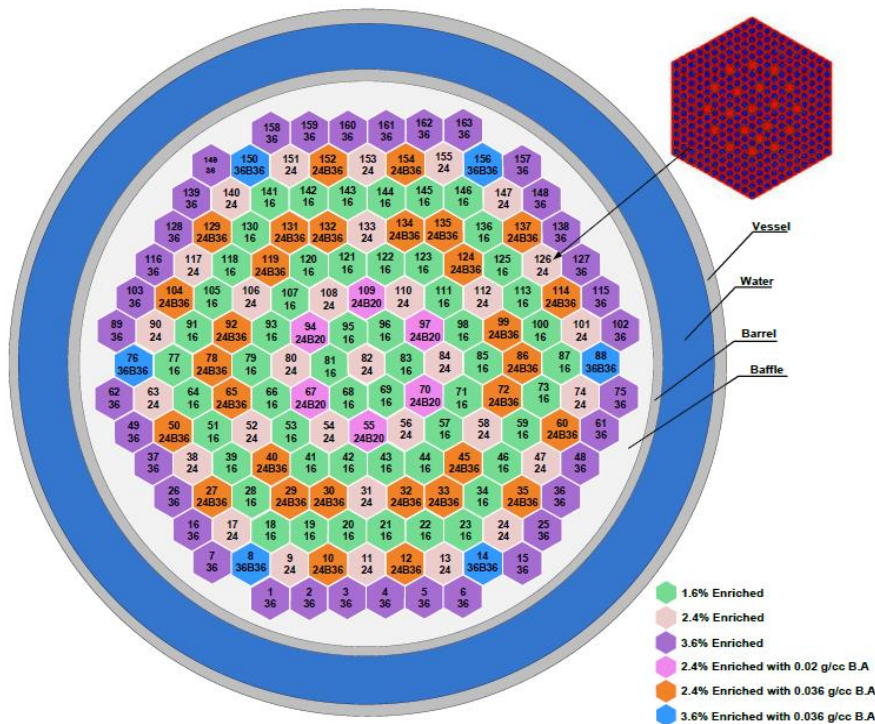
پیش بینی دقیق عملکرد ترموهیدرولیکی یک راکتور هسته ای در بحث طراحی آن از دو جنبه اقتصادی و ایمنی مورد توجه می باشد. حصول اطمینان از خنک سازی کافی میله سوخت جهت حفظ یکپارچگی قلب راکتور در طی عملکرد عادی و غیرعادی، گذارها و حوادث، لازم و ضروری است. تجزیه و تحلیل ترموهیدرولیکی به بررسی موضوع انتقال حرارت و ویژگی های هیدرودینامیکی قلب راکتور می پردازد. به دست آوردن شرایط عملکردی ترموهیدرولیکی راکتور هسته ای در حالت پایا، مقدمه ای برای بررسی و تحلیل حوادث است. لذا ابتدا بایستی رفتار راکتور در حالت پایا توسط کد بررسی و مدل سازی شود. کد COBRA-EN [۲۱] یکی از پرکاربردترین کدهای تحلیل ترموهیدرولیکی راکتورهای آب سبک می باشد. ارزیابی های بسیاری که در کاربرد این کد صورت گرفته است نشان می دهد که این کد قابلیت پیش بینی رفتار سیستم های هسته ای و

می‌رود. عدد ۱۰۰۰ که در انتهای نوع راکتور می‌آید، نماینده‌ی توان الکتریکی واحد نیروگاهی بر حسب مگاوات است. راکتور نیروگاه هسته‌ای بوشهر [۱۸] هم نوعی از راکتور VVER با قدرت ۳۰۰۰ مگاوات حرارتی می‌باشد. قلب VVER-1000 از مجتمع های سوخت به شکل شش ضلعی تشکیل شده که این مجتمع ها در یک آرایش شش ضلعی با گام ۲۳۶ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. تعداد مجتمع‌های سوخت در داخل قلب به اندازه‌ی آن‌ها و توان اسمی راکتور بستگی دارد. بیشترین اندازه‌ی مجتمع سوخت توسط الزامات ایمنی هسته‌ای تعیین می‌شود، به نحوی که احتمال ایجاد یک جرم بحرانی از بین برو و کمترین اندازه‌ی مجتمع سوخت به راندمان اقتصادی محدود می‌شود. در شکل ۱ آرایش قلب راکتور بوشهر با درصد غناهای متفاوت آن و در شکل ۲ نمایی از میله سوخت نشان داده شده است.

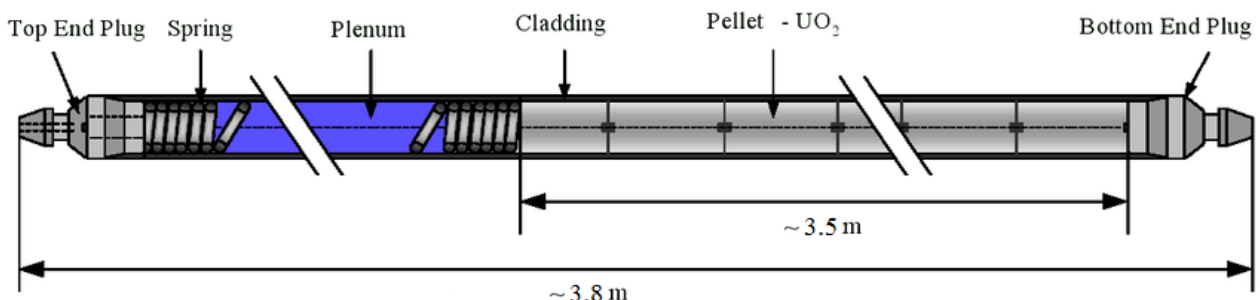
غیرهسته‌ای را با دقت بالایی دارد. یکی دیگر از نرم‌افزارهای قدرتمند در زمینه شبیه‌سازی انتقال حرارت نرم‌افزار ANSYS FLUENT می‌باشد. نرم‌افزار فلوئنت، یک نرم‌افزار مهندسی به کمک رایانه در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای مدل کردن جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه‌های پیچیده می‌باشد. این نرم‌افزار امکان تغییر شبکه، به صورت کامل و تحلیل جریان با شبکه‌های غیرساخت‌یافته برای هندسه‌های پیچیده را فراهم می‌سازد.

۱-۱- آشنایی با راکتور VVER-1000 بوشهر

راکتور VVER نوعی راکتور هسته‌ای با محفظه تحت فشار است که آب در آن به عنوان خنک‌کننده و کندکننده به کار



شکل ۱ آرایش قلب راکتور بوشهر از نوع VVER-1000 [۱۸]



شکل ۲ نمایی از میله سوخت هسته‌ای

۷/۷۳	قطر داخلی غلاف (mm)
۹/۱	قطر خارجی غلاف (mm)
UO ₂	ماده تشکیل دهنده سوخت
Alloy Zr + 1% Nb	ماده تشکیل دهنده غلاف
۱۲/۷۵	گام میله سوخت (mm)
۶۰۲۷	ضریب انتقال حرارت گپ (W/m ² .K)
لوله راهنما	
۲۰	تعداد در هر مجتمع سوخت
۱۳	قطر خارجی (mm)

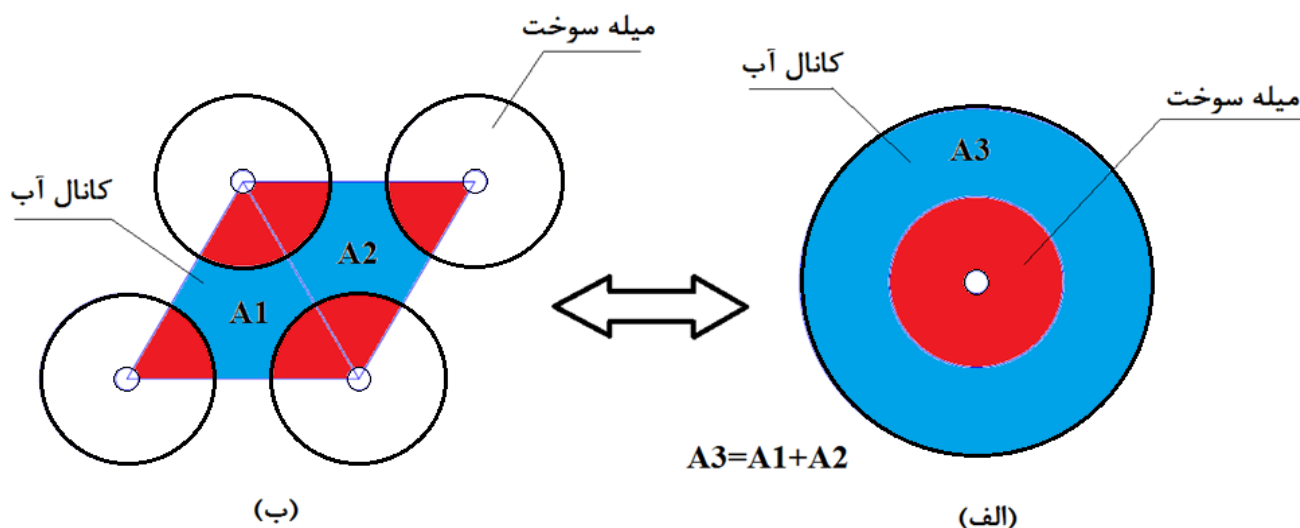
۲- هندسه و مدل سازی میله سوخت راکتور

با توجه به این که فرایند شکافت هسته‌ای و تولید مقدار قابل توجهی از انرژی گرمایی و همچنین برداشت آن توسط سیال خنک کننده در قلب راکتور صورت می‌گیرد، مدل سازی این بخش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا در این قسمت به تشریح محاسبات مربوط به قلب راکتور و توزیع توان می‌پردازیم. در این مدل سازی، آرایش یک میله سوخت داغ به صورت شکل ۳ در نظر گرفته شده است.

در جدول مشخصات هندسی و پارامترهای ترموهیدرولیکی قلب راکتور بوشهر نشان داده شده است.

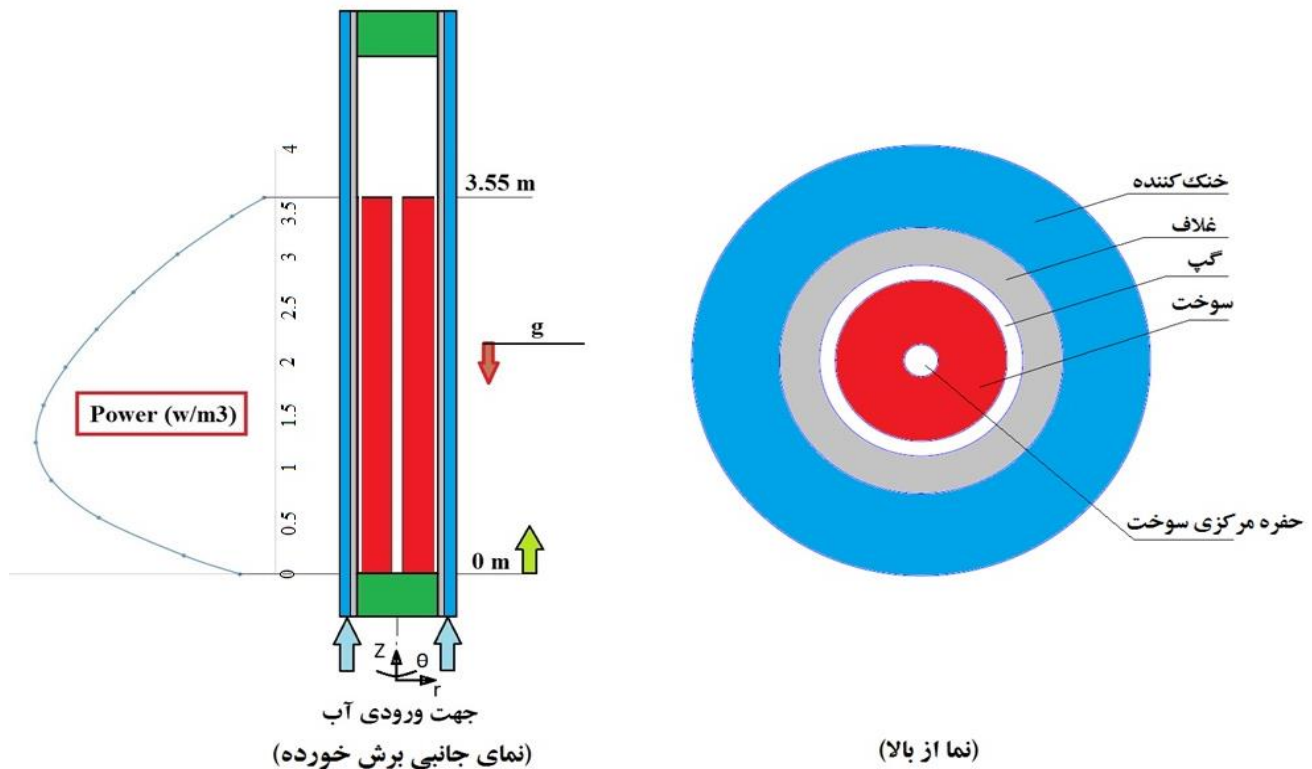
جدول ۱ مشخصات راکتور هسته‌ای نیروگاه بوشهر

شرایط کارکرد قلب راکتور	
۱۵/۷	فشار کاری (MPa)
۳۱۲۰	قدرت حرارتی راکتور (MWt)
۸۴۸۰۰	دبی حجمی ورودی خنک کننده (m ³ /h)
۵۶۴/۱۵	دمای ورودی خنک کننده (K)
۵۱۵	دبی حجمی عبوری از هر مجتمع سوخت (m ³ /hr)
مجتمع سوخت	
شش وجهی	شکل هندسی مجتمع سوخت
۱۶۳	تعداد مجتمع سوخت
۲۳۶	گام بین مجتمع های سوخت (mm)
۳۱۱	تعداد سوخت های هر مجتمع سوخت
میله سوخت	
۱/۵	قطر داخلی قرص سوخت (mm)
۷/۵۷	قطر خارجی قرص سوخت (mm)
۱۱	ارتفاع قرص سوخت (mm)



گرفته‌اند. سوخت و غلاف در تماس با یکدیگر نبوده و فضای بین آنها در ابتدا از گاز هلیوم با فشار ۲۰ تا ۲۵ بار پر می‌شود. بالای میله سوخت نیز فضائی وجود دارد که ابتدا از گاز هلیوم انباشته می‌باشد و بعداً گازهای حاصل از شکافت در آن جمع می‌گردند.

در شکل ۴ هندسه میله سوختی که شبیه سازی بر اساس آن انجام می‌گیرد، نمایش داده شده است. میله سوخت شامل غلافی از جنس زیرکالوی می‌باشد که ستونی از قرص های دی اکسید اورانیوم (دارای کانالی در مرکز و یا فاقد آن) در آن جای

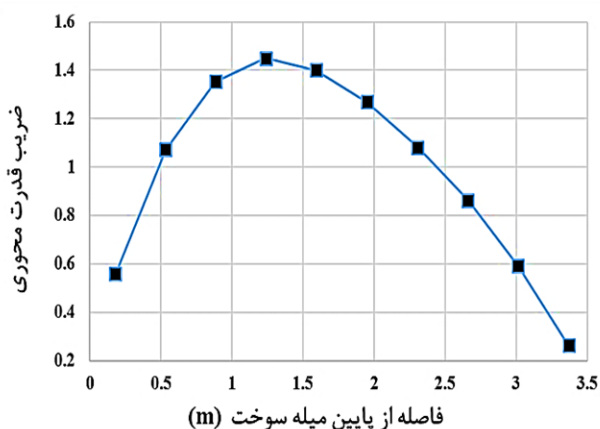


شکل ۴ هندسه میله سوختی شبیه‌سازی شده

= میزان توان خطی

$$q_1 = \left(\frac{3000 \times 10^3}{163 \times 311 \times 3.55} = 16.67 \text{ kw/m} \right) \quad (1)$$

فاکتور ضریب پیک محوری توان میله سوخت، که به صورت توان ماکزیمم محوری در میله سوخت (توان میله داغ) به توان متوسط در قلب راکتور تعریف می‌شود و مقدار آن در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵ ضریب قدرت محوری در طول میله سوخت

میله سوخت در داخل خنک کننده آب، با فشار و دمای مشخص، قرار دارد و فرض می‌شود که فشار خنک کننده و دمای سطح خارجی غلاف در شرایط بهره‌برداری پایا و عادی راکتور ثابت می‌باشند (مقادیر ثابت طراحی). با توجه به این که دما در میله داغ (Hot Rod) نسبت به سایر میله‌های موجود در قلب راکتور بالاتر است و در شرایط از دست رفتن سیال خنک کننده احتمال آسیب دیدگی غلاف و سوخت در نقطه داغ (Hot Spot) بالاتر است، ابتدا به تشریح محاسبات مربوط به نقطه داغ و توزیع توان در میله داغ می‌پردازیم. در حقیقت یکی از معیارهای مهم در تحلیل حادثه^۱ LOCA، دمای نقطه داغ می‌باشد که به دلیل از دست رفتن سیال خنک کننده ممکن است از مقدار تعیین شده در بازه طراحی تجاوز کند. لذا در محاسبات توزیع توان برای نقطه داغ از میان حالت‌های مختلف توزیع توان در میله‌های سوخت، حالتی را برگزیدیم که مقدار ضریب توزیع توان در میله داغ نسبت به سایر حالت‌ها بزرگ‌تر باشد تا شرایط بدبینانه‌تری برای تحلیل حادثه در نظر گرفته شود. لذا جهت انجام محاسبات، ابتدا به معرفی پارامترهای مربوطه می‌پردازیم:

q_1 : توان متوسط خطی، که به صورت نسبت توان حرارتی نامی به مجموع طول میله‌های سوخت موجود در قلب تعریف می‌شود و مقدار آن برابر است با:

^۱ Lose of Coolant Accident

T : درجه حرارت برحسب کلوین، $\dot{q}'''$: چگالی توان تولیدی در سوخت (w/m^3) . K : ضریب هدایت حرارتی سوخت $(w/m.K)$ ، ρ : چگالی سوخت (kg/m^3) ، C_p : ظرفیت حرارتی ویژه سوخت $(J/kg.K)$.

همچنین برای محاسبه میزان شار گرمایی انتقالی از غلاف به سیال خنک کننده می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود [۲۳].

$$q'' = h_{coolant}(T_{Clad} - T_{coolant}) \quad (۶)$$

که $h_{coolant}$ ضریب جابجایی خنک کننده می‌باشد و از رابطه دیتوس-بولتر برای مدل انتقال حرارت قابل محاسبه است [۲۴]:

$$(Nu_{c.t.}) = (0.023 Re^{0.8} Pr^{0.333})$$

$$Nu = \psi(Nu_{c.t.})$$

که برای آرایش کانال ۳ وجهی داریم:

$$\psi = 0.9217 + 0.1478 P/D - 0.1130 e^{-7\left(\frac{P}{D} - 1\right)}$$

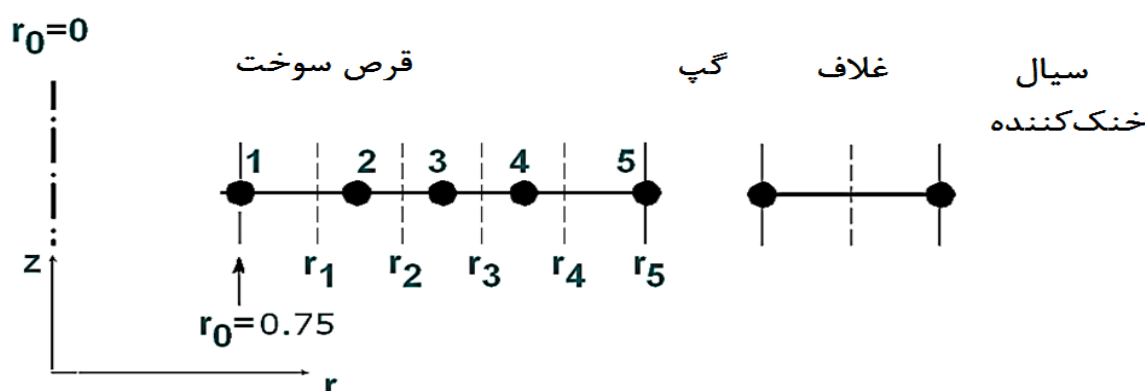
$$\psi = 1.122$$

$$Nu = 1.122(0.0318 Re^{0.8} Pr^{0.333}) =$$

$$= 0.0258 Re^{0.8} Pr^{0.333}$$

۳-۱- مدل سازی با کد COBRA-EN

از آنجا که ضریب هدایت حرارتی سوخت تابعی از دما است و توزیع توان در سوخت نیز متفاوت است، حل دقیق بایستی بوسیله روش‌های عددی انجام شود. روش تفاضل محدود به عنوان یک روش سریع و مناسب برای اینگونه محاسبات به طور کامل شناخته شده است که در کد COBRA-EN برای محاسبات از همین روش استفاده شده است. نحوه شبکه‌بندی استفاده شده در این کد در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶ نحوه در نظر گرفتن مش‌های شعاعی برای حل عددی مدل هدایت حرارتی سوخت

F_r^N : فاکتور ضریب پیک شعاعی توان میله سوخت، که به صورت توان ماکزیمم شعاعی در میله سوخت (توان میله داغ) به توان متوسط در قلب راکتور تعریف می‌شود و مقدار آن برابر است با ۱/۳۴.

K_n : ضریب محاسبه عدم قطعیت در اندازه‌گیری توان و مقدارش برابر با ۱/۰۴ است. [۱۸].

در نتیجه فاکتور ضریب کلی برابر است با:

$$F_q = F_a^N \times F_r^N \times K_n \quad (۲)$$

محاسبه ماکزیمم ضریب کلی در داغ ترین میله سوخت:

$$F_q = 1.45 \times 1.34 \times 1.04 = 2.02 \quad (۳)$$

در نتیجه ماکزیمم توان خطی در میله سوخت داغ برابر است با:

$$q_{max} = 2.02 \times 16.67 = 33.67 \text{ (kw/m)} \quad (۴)$$

۳- معادلات حاکم

همانطوری که گفته شد بر اثر پدیده شکافت هسته‌ای در سوخت مقدار زیادی انرژی تولید می‌شود که می‌باید به خارج از میله سوخت هدایت شود، برای محاسبات حرارتی میله سوخت بایستی معادله انتقال حرارت در دستگاه مختصات استوانه‌ای به کار گرفته شود. فرم کلی انتقال حرارت در دستگاه استوانه‌ای به صورت زیر است [۲۲].

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(Kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(K \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}''' = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (۵)$$

که در رابطه فوق:

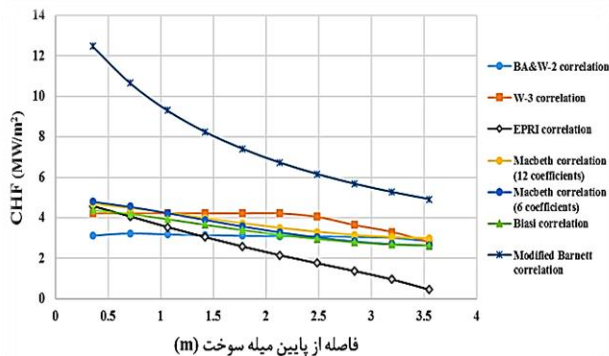
جدول ۲ مشخصات هیدرولیکی کانال دور میله سوخت داغ

نوع کانال	محیط گرم شده (mm)	محیط تر شده (mm)	مساحت (mm ²)
دایره‌ای	۲۸/۵۸۸	۲۸/۵۸۸	۷۵/۷۴۴

در این مدل‌سازی طول میله سوخت به ۱۰ المان تقسیم شده است. در شکل نمایی از میله سوخت که در نود ۱۴ دارای ماکزیمم دما می‌باشد نشان داده شده است. همچنین در جدول مشخصات ترموهیدرولیکی کانال موجود در مدل‌سازی آورده شده است.

۳-۱-۱- محاسبه شار حرارتی بحرانی (CHF)

میزان تولید توان در راکتورهای هسته‌ای محدود به توانایی سیستم خنک کننده در برداشت حرارت از میله‌های سوخت می‌باشد. در راکتورهای PWR، قابلیت برداشت حرارت به میزان شار حرارت بحرانی محدود می‌گردد. وقوع شار حرارتی بحرانی باعث بالا رفتن ناگهانی دمای غلاف شده و موجب آسیب میله سوخت می‌شود. طراحی ترموهیدرولیک قلب راکتور نیازمند حاشیه ایمنی مناسب از وقوع شار حرارت بحرانی است. در کد COBRA-EN هفت رابطه ی تجربی برای محاسبه ی شار حرارت بحرانی ارائه شده است که در شکل ۸ این ۷ رابطه باهم مقایسه گردیده است و همانطور که مشاهده می‌گردد رابطه EPRI محافظه کارانه ترین نتیجه یعنی کمترین مقدار را برای CHF در نتیجه مینیمم مقدار برای DNBR پیش بینی کرده و البته بهترین همخوانی را با [۱۸] FSAR در مدل راکتور بوشهر دارد [۱۵] و [۲۵].



شکل ۸ مقایسه تغییرات CHF در طول کانال داغ با ۷ رابطه موجود در کد COBRA-EN

معادلات بقای جرم، انرژی، ممنتوم محوری و عرضی در فرم تفاضل محدود استفاده شده در کد COBRA-EN به ترتیب به صورت روابط زیر می‌باشند:

$$A_i \frac{\Delta X_j}{\Delta t} (\rho_{ij} - \rho_{ij}^n) + m_{ij} - m_{ij-1} + \Delta X_j \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} = 0 \quad (7)$$

$$\Delta \left[\rho_{ij}'' (h_{ij} - h_{ij}^n) + h_{ij} (\rho_{ij} - \rho_{ij}^n) \right] + \frac{1}{\Delta X_j} (m_{ij} h_{ij}^* - m_{ij-1} h_{ij-1}^*) + \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} h_{kj}^* = \sum_{r \in i} P_r \Delta_{ir} q_{rj}'' - \sum_{k \in i} w_{kj}' (h_{ij} - h_{nj}) - \sum_{k \in i} C_k s_k (T_{ij} - T_{nj}) + \sum_{r \in i} r_Q \Delta_{ir} q_{rj}' \quad (8)$$

$$\frac{\Delta X_j}{\Delta t} (m_{ij} - m_{ij}^n) + m_{ij} U_{ij}' - m_{ij-1} U_{ij-1}' + \Delta X_j \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} U_{kj}' = -A_i (P_{ij} - P_{ij-1}) - g A_i \Delta X_j \rho_{ij} \cos \theta \quad (9)$$

$$- \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta X f \phi^2}{D_h \rho_1} + K v^* \right) \left| m_{ij} \right| \frac{m_{ij}}{A_i} - f_r \Delta X_j \sum_{k \in i} w_{kj}' (U_{ij}' - U_{nj}') \quad (10)$$

$$= \frac{s_k}{l_k} \Delta X_j P_{kj-1} - \frac{1}{2} \left(K_G \frac{\Delta X v'^*}{sl} \right)_{kj} \left| w_{kj} \right| w_{kj}$$

میله سوخت داغ



شکل ۷ ماکزیمم دمای سوخت در نود شماره ۱۴ در میله سوخت داغ

روش مورد استفاده در نرم افزار FLUENT برای گسسته سازی معادلات حاکم، روش حجم محدود است. روش حجم محدود یک روش انتگرالی می باشد، یعنی اینکه از معادله های دیفرانسیل اولیه در فضای فیزیکی انتگرال گرفته می شود و در مرحله بعد آنها را به روش عددی حل می کند. از این رو، در روش حجم محدود شبکه نقاط مستقیماً در فضای فیزیکی ایجاد می گردد. این نرم افزار با استفاده از حافظه دینامیک، ساختار مناسب داده ها و اطلاعات، کنترل و انعطاف پذیری محاسبات را ممکن می سازد. در شکل ۹ میله سوخت شبیه سازی شده با نرم افزار انسیس فلوئنت با نشان دادن بخش های مختلف میله سوخت و شبکه بندی مورد نظر (بعد از بررسی استقلال از مش تعداد نودها ۱۳۸۰۳۰) نشان داده شده است. در این مدل سازی با توجه به تقارن موجود در میله سوخت از مدل تقارن محوری (Axisymmetric) استفاده شده است.

این رابطه ی تجربی EPRI برای محاسبه شار حرارتی بحرانی که در سال ۱۹۸۲ توسط دانشگاه کلمبیا ارائه شد، به صورت زیر تعریف می گردد:

$$q_{CHF}'' = \frac{1}{0.0036} \frac{A.F_A - X_{in}}{C.F_C.F_g.F_{nu} + \left(\frac{h - h_{in}}{0.0036.q''.h_{fg}} \right)} \quad (11)$$

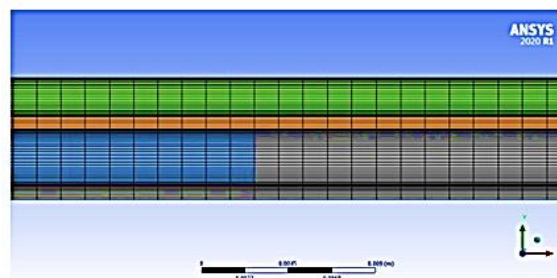
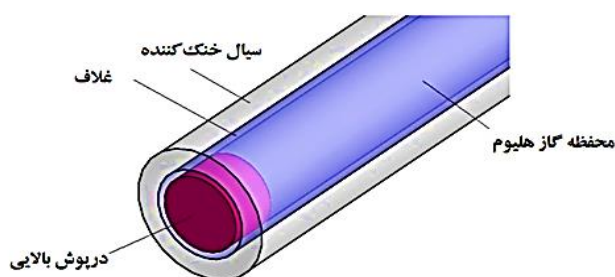
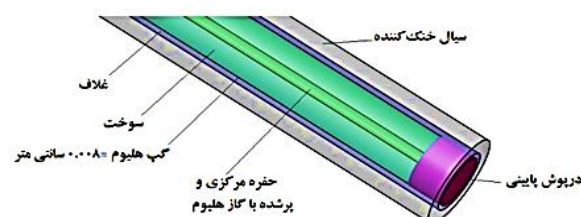
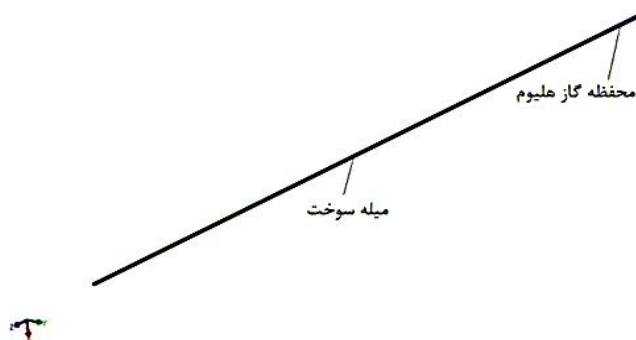
که در رابطه بالا:

$$A = 0.5328.Pr^{0.1212}(0.0036.G)^{-0.3040-0.3285.Pr}$$

$$C = 1.6151.Pr^{1.4066}(0.0036.G)^{(0.4843-2.0749.Pr)}$$

که در روابط بالا Pr عدد پرانتل و G شار جرمی خنک کننده می باشد.

۳-۲- مدل سازی با نرم افزار ANSYS FLUENT



شکل ۹ هندسه و شبکه مش بندی میله سوخت به صورت تقارن محوری در نرم افزار انسیس فلوئنت

معادلات ناویر استوکس استفاده شده است، فرم دیفرانسیلی معادله پیوستگی برای سیال تراکم پذیر ناپایا در رابطه (۱۲) آورده شده است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (12)$$

فرم دیفرانسیلی معادلات مومنتوم برای سیال تراکم پذیر ناپایا نیز در رابطه (۱۳) آورده شده است:

با توجه به اینکه گاز هلیوم موجود در داخل میله سوخت با محیط پیرامون خود هیچگونه تبادل جرمی ندارد، بنابراین شرایط اولیه حاکم بر مساله از اهمیت ویژه ای برخوردار خواهد بود. به عبارت دیگر به عنوان مثال با تغییر فشار گاز هلیوم داخل محفظه که به عنوان یکی از پارامترهای مورد بررسی در کار حاضر می باشد، جرم گاز محصور در داخل گپ میله سوخت نیز تغییر خواهد کرد. بنابراین برای حل مساله از فرم ناپایا

گیرد. مدل $SST K-\omega$ یک سطح آشفتگی بزرگی را در نواحی با تنش نرمال زیاد مانند نواحی سکون و یا نواحی با شتاب زیاد، تولید می‌کند. این توانایی $SST K-\omega$ یک مزیت و برتری را نسبت به مدل $k-\epsilon$ پسایلون بیان می‌کند.

۴- نتایج

به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی، قسمتی از نتایج مربوط به دماهای سوخت، غلاف و سیال خنک‌کننده با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مرجع [۱۵] مورد مقایسه قرار گرفته و در جدول ۳ به همراه درصد خطا ذکر گردیده است که نتایج حاصله حاکی از شبیه‌سازی دقیق مسئله توسط دو کد COBRA-EN (روش روشن تفاضل محدود) و ANSYS-FLUENT (روش حجم محدود) را نشان می‌دهد. در شکل ۱۰ توزیع دمای محوری در بخش داغ میله سوخت در جهت شعاعی از حفره داخلی میله سوخت تا دمای سیال خنک‌کننده نشان داده شده است همانطور که از نمودار ملاحظه می‌گردد دما در نقطه داخلی ماکزیمم می‌باشد که در جهت شعاعی رفته رفته با توجه به ضریب هدایت پایین سوخت یک گرادیان دمایی نسبتاً شدیدی ایجاد می‌گردد همچنین با توجه به ضریب هدایت حرارتی پایین هلیوم که در بخش گپ سوخت تزریق شده است خود باعث تضعیف انتقال حرارت شده در نتیجه در بخش گپ کاهش دما دارای شیب تندی تا سطح داخلی غلاف می‌باشد و بعد از آن حرارت از سطح خارجی غلاف به سیال خنک‌کننده که در کانال جریان دارد انتقال می‌یابد.

$$\left(\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla(\rho\vec{V})\right) = \rho\vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \lambda \cdot \nabla(\nabla \cdot \vec{V}) \quad (13)$$

در کار حاضر با توجه به گرادیان‌های دمایی بالایی که مورد بررسی قرار می‌گیرد، برای همبستگی بین فشار، دما و چگالی هلیوم محصور بین سوخت و غلاف از فرض گاز ایده‌آل استفاده شده است.

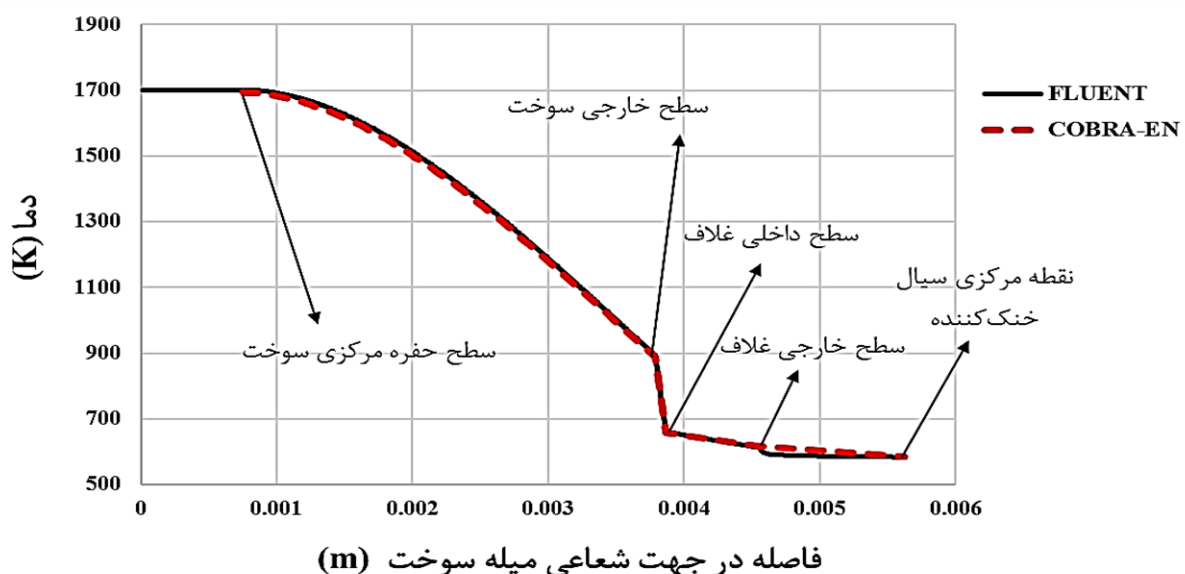
برای بررسی نوع جریان سیال خنک‌کننده در داخل کانال باید عدد رینولدز محاسبه و بررسی گردد، برای محاسبه عدد رینولدز از رابطه زیر داریم:

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} = \frac{\dot{m} D_h}{\mu A} = \frac{(mass\ flux) D_h}{\mu} \quad (14)$$

$$= \frac{(mass\ flux) 4A}{\mu P} = \frac{4056.4 \times 4 \times 7.5744 \times 10^{-5}}{92.095 \times 10^{-6} \times \pi \times D_{fuel}}$$

$$= 466790$$

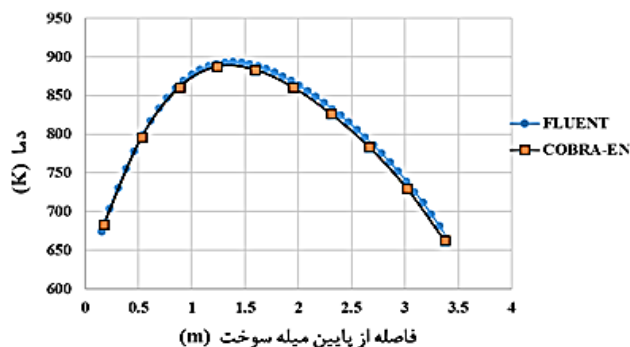
عدد رینولدز محاسبه شده حاکی از وجود جریان آشفته در داخل کانال خنک‌کننده می‌باشد. در این مدل‌سازی برای جریان آشفته از مدل $SST K-\omega$ استفاده گردیده است. مدل آشفتگی $SST K-\omega$ یک مدل دو معادله‌ای لزجت گردابی است که بسیار متداول و معمول می‌باشد. کاربرد روابط $k-\epsilon$ امگا در بخش درونی لایه مرزی سبب می‌شود که این مدل در تمام ناحیه زیر لایه لزج نزدیک دیواره عملکرد بسیار مناسبی داشته باشد و بنابراین مدل $SST K-\omega$ می‌تواند به عنوان یک مدل آشفتگی بدون هیچ گونه تابع میرایی اضافی مورد استفاده قرار



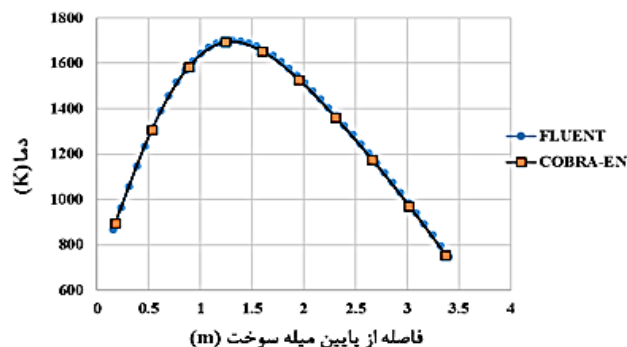
شکل ۱۰ توزیع دمای شعاعی در میله سوخت

می‌گردد دمای محوری سوخت رابطه مستقیمی با مقادیر ضرایب قدرت محوری دارد و در نقطه‌ای که مقدار ضریب قدرت محوری ماکزیمم باشد (نود ۴م) در نتیجه در آن المان دمای سوخت ماکزیمم مقدار می‌باشد.

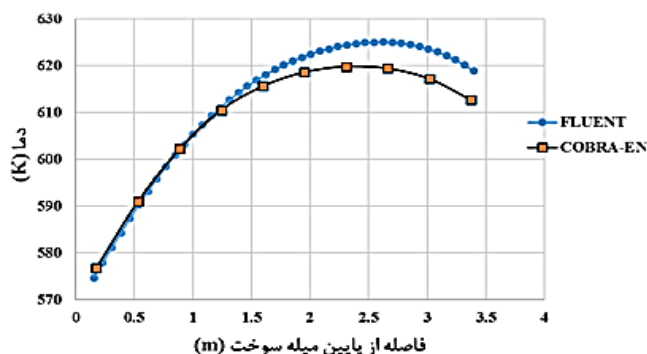
همچنین نمودار توزیع دمایی محوری در طول میله سوخت در شکل ۱۱ در ۴ بخش از میله سوخت، الف) سطح داخلی سوخت، ب) سطح خارجی سوخت، ج) سطح داخلی غلاف و د) سطح خارجی غلاف نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه



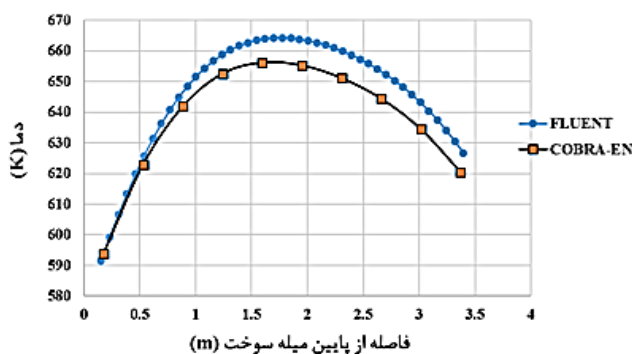
(ب)



(الف)



(د)



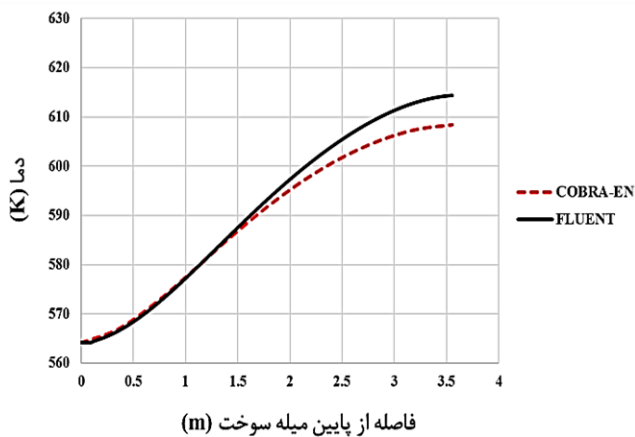
(ج)

شکل ۱۱ توزیع دمای محوری در بخش‌های مختلف میله سوخت: الف) سطح داخلی سوخت، ب) سطح خارجی سوخت، ج) سطح داخلی غلاف و د) سطح خارجی غلاف Z

جدول ۳ محاسبات ترموهیدرولیکی برای مجتمع سوخت انتخابی و میله سوخت داغ برای قلب راکتور بوشهر

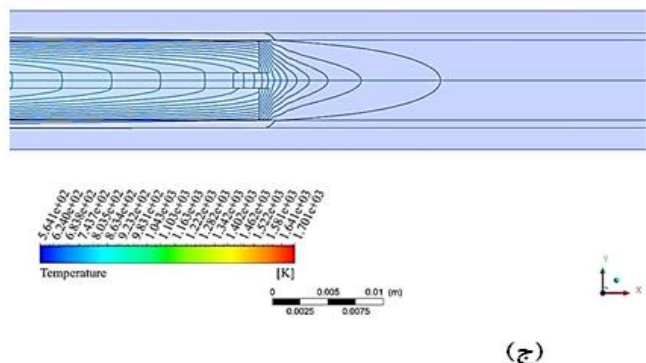
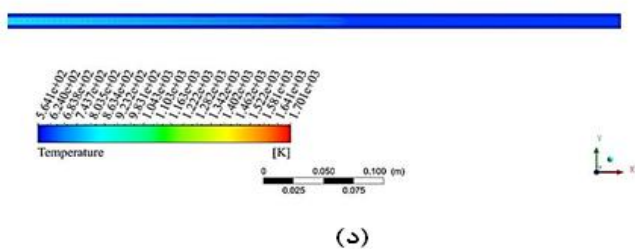
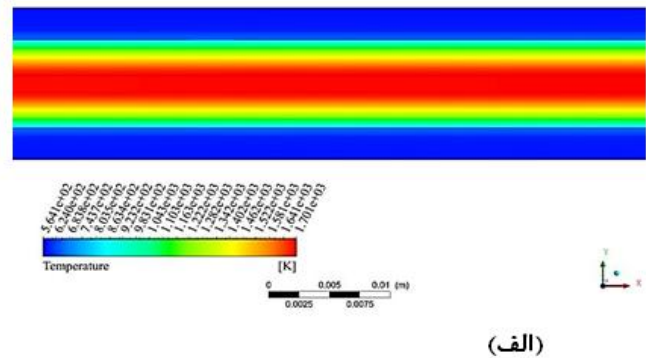
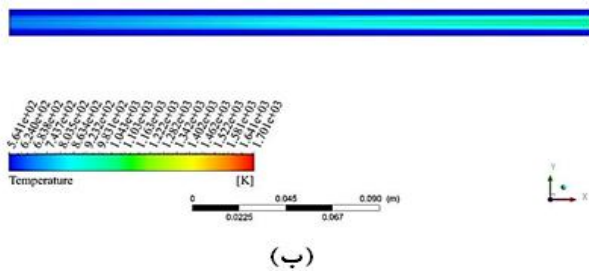
پارامترهای ترموهیدرولیکی	COBRA-EN مدل‌سازی شده	انسینس فلوئنت	COBRA-EN [۱۵] بدون جریان عرضی	COBRA-EN [۱۵] با جریان عرضی	$\Delta_1\%$ درصد خطا	$\Delta_2\%$ درصد خطا	نتایج گزارش شده در FSAR [۱۸]
	(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۱) با (۴)	(۲) با (۴)	
ماکزیمم دمای سطح داخلی سوخت (K)	۱۶۹۳/۳	۱۷۰۱	۱۶۹۲/۷	۱۶۹۳/۷	۰/۰۲	۰/۰۴	کوچکتر از ۲۱۵۶/۵
ماکزیمم دمای سطح خارجی سوخت (K)	۸۸۷/۶	۸۹۱/۴	۸۸۷/۲	۸۸۷/۸	۰/۰۲	۰/۰۴	---
ماکزیمم دمای سطح داخلی غلاف (K)	۶۵۶/۲	۶۶۱/۳	۶۵۴/۷	۶۶۸/۱	۱/۷	۱	---
ماکزیمم دمای سطح خارجی غلاف (K)	۶۱۵/۶	۶۲۰	۶۱۷/۱	۶۲۰/۵	۰/۷	۰/۰۸	کوچکتر از ۶۲۵/۱۵
ماکزیمم دمای متوسط سوخت (K)	۱۲۸۷/۵	---	۱۲۸۶/۹	۱۲۸۷/۷	۰/۰۱	---	---
متوسط ماکزیمم آنتالپی شعاعی سوخت (MJ/kg)	۰/۲۹۴	---	۰/۲۹۴	۰/۲۹۳	۰/۳	---	کوچکتر از ۰/۹۶۳
متوسط دمای خنک کننده در کانال (K)	۵۸۸/۹۴	۵۹۲/۲	۵۸۷/۸	۵۸۷/۹۲	۰/۱۷	۰/۷	---

دمای خنک کننده در خروجی کانال (K)	۶۰۸/۳۸	۶۱۴/۳	۶۰۶/۴۲	۶۰۶/۲۸	۰/۳۴	۱/۳	---
میزان افزایش آنتالپی خنک کننده در طول کانال (MJ/kg)	۰/۲۶۵	---	۰/۲۵۱	۰/۲۵۱	۵	---	---
ماکزیمم شار حرارتی (MW/m^2)	۱/۱۷۷	---	۱/۱۷۷	۱/۱۷۷	۰	---	---
مدل شار حرارتی بحرانی	EPRI	---	EPRI	EPRI	---	---	---
مینیمم DNBR برای میله سوخت داغ	۱/۹۷۶	---	۱/۹۳	۱/۸۶	۵/۸	---	بزرگتر از ۱/۷۵
متوسط سرعت محوری سیال در طول کانال (m/s)	۵/۹۴	۵/۹۲	۵/۸۹	---	---	---	---



شکل ۱۲ تغییرات دمای سیال خنک کننده در طول کانال

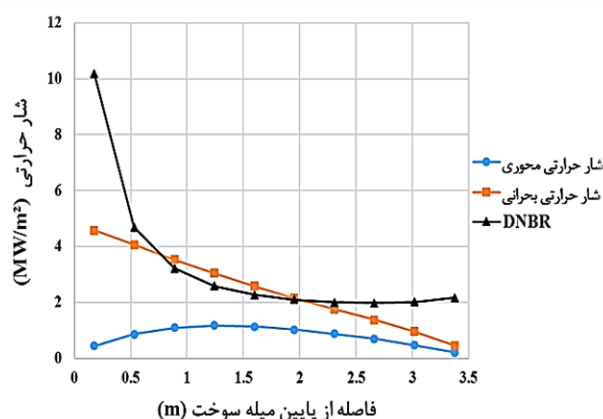
در شکل ۱۲ تغییرات دمای سیال خنک کننده در طول کانال نشان داده شده است، دمای سیال خنک کننده مطابق شکل در پایین میله سوخت و ورودی کانال ۵۶۴،۱۵ کلوین بوده و در طول میله سوخت با برداشت حرارت از سطح غلاف سوخت افزایش پیدا می کند. بیشینه دمای سیال خنک کننده در بالای میله سوخت ۶۰۸ کلوین توسط کد COBRA-EN و ۶۱۴ کلوین توسط نرم افزار فلوئنت محاسبه شده است. در شکل ۱۳ هم کانتورهای دمایی در بخش های حفره مرکزی، سوخت، گپ هلیوم، غلاف و سیال خنک کننده میله سوخت به صورت برش محوری در ۴ قسمت ابتدا، انتها، مقطع ماکزیمم دمایی و فصل مشترک سوخت و محفظه بالایی گاز هلیوم نشان داده شده است.



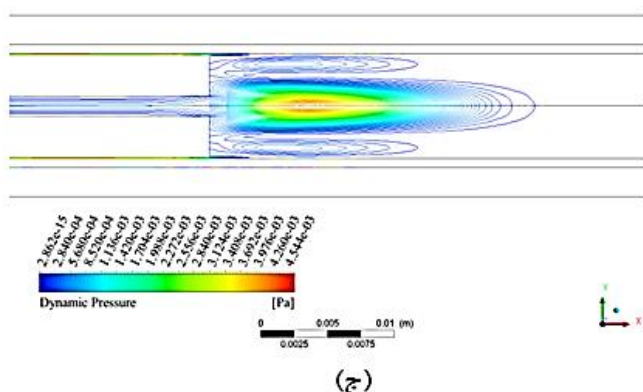
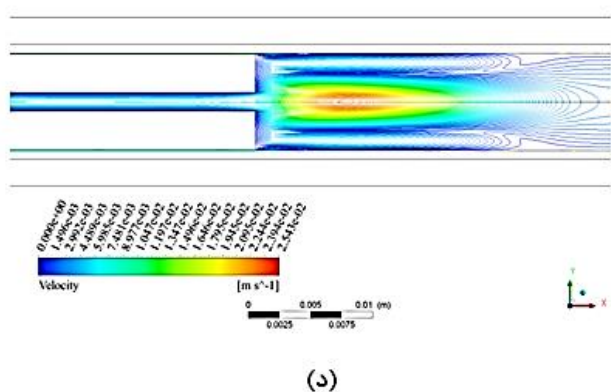
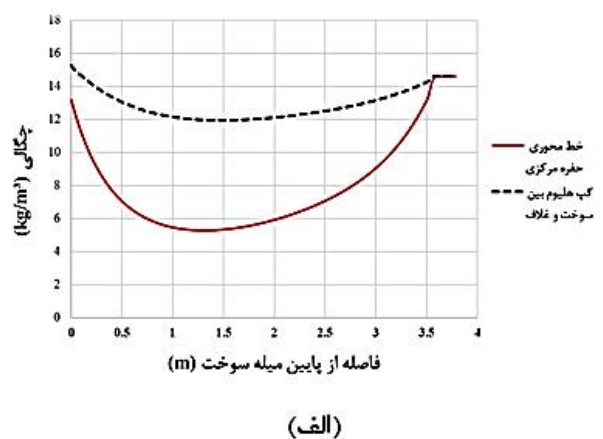
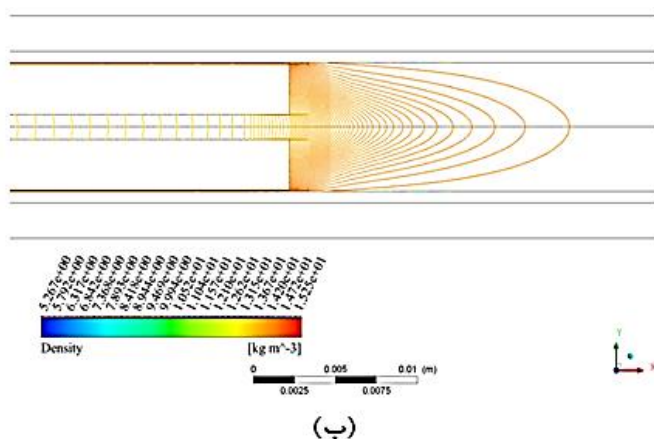
شکل ۱۳ کانتور تغییرات دمایی میله سوخت (الف) در بخش ماکزیمم دمایی سوخت، (ب) در ابتدای میله سوخت، (ج) در بخش محفظه گاز هلیوم بالای سوخت و (د) بخش انتهایی میله سوخت

در شکل ۱۵- (الف) نمودار تغییرات چگالی گاز هلیوم محبوس در میله سوخت در دو راستای خط محوری حفره مرکزی سوخت و خط محوری در فصل مشترک بین سوخت و غلاف نشان داده شده است همانطور که مشاهده می‌گردد چون تغییرات دمایی در حفره مرکزی نسبت به گپ بین سوخت و غلاف بیشتر است در نتیجه مقدار چگالی گاز در این ناحیه کمتر می‌باشد و در نهایت در محفظه بالایی سوخت چگالی، دما و فشار گاز هلیوم یکسان می‌گردد. همچنین در شکل ۱۵- (ب) تا (د) به ترتیب کانتور تغییرات چگالی، تغییرات فشار دینامیکی و تغییرات سرعت گاز هلیوم در فضای پایینی محفظه جمع‌آوری گاز هلیوم و نزدیک به بخش انتهایی سوخت نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد در ناحیه پایین محفظه گاز هلیوم (پلنوم) نزدیک به انتهای سوخت گردابه‌های سرعت و به تبع آن گردابه‌های فشار دینامیکی به دلیل ترکیب گاز هلیوم خروجی از دو بخش حفره مرکزی و گپ (حد فاصل بین سوخت و غلاف) ایجاد شده است که دلیل آن اختلاف سرعت و چگالی گاز هلیوم این دو بخش می‌باشد، که با فاصله گرفتن از این ناحیه (بخش بالایی پلنوم) و رسیدن به یک سرعت و چگالی یکسان این گردابه‌ها از بین می‌روند.

در شکل ۱۴ نمودار مربوط به CHF در طول کانال با افزایش دمای سیال روند کاهشی دارد. لازم به ذکر است تغییرات پارامتر DNBR متناسب با تغییرات شار حرارتی بحرانی و شار حرارتی واقعی میله سوخت در طول کانال می‌باشد که در طول کانال به یک مقدار مینیمم می‌رسد (معمولاً در ماکزیمم دمای غلاف) در تمامی حالات بررسی شده مقدار DNBR (به عنوان یک پارامتر ایمنی) از حاشیه ایمنی بالایی برای میله سوخت مورد نظر برخوردار است.



شکل ۱۴ تغییرات شار حرارتی بحرانی و DNBR در طول کانال



شکل ۱۵ (الف) نمودار تغییرات چگالی گاز هلیوم در راستای خط محوری (ب) کانتور تغییرات چگالی گاز هلیوم (ج) تغییرات فشار دینامیکی گاز هلیوم و (د) تغییرات سرعت گاز هلیوم در میله سوخت

۵- نتیجه گیری

در این مقاله آنالیز ترموهیدرولیک به روش تک کانال برای میله سوخت داغ راکتور هسته‌ای بوشهر VVER-1000 در شرایط قدرت اسمی مدلسازی شده است. توزیع توان خطی (بر واحد طول میله) را از مرجع [۱۸] استخراج کرده و در کد COBRA-EN و نرم افزار ANSYS FLUENT وارد شده است. لازم به ذکر است که در این مدلسازی از کد COBRA-EN توسعه یافته جهت مدل سازی حفره مرکزی سوخت VVER بهره برده شده است. نتایج بدست آمده در حالت پایا با نتایج تحلیلی و گزارش آنالیز ایمنی راکتور بوشهر مقایسه شده است که مبین سازگاری خوب نتایج حاصله با نتایج مرجع می باشد. همچنین همانطور که ذکر گردید یکی از محدودیت ها در طراحی راکتورهای هسته ای^۱ MDNBR یا حداقل نسبت شار حرارت بحرانی به شار حرارت واقعی قلب است. وقوع پدیده‌ی CHF یا رسیدن به این شار حرارتی، منجر به افزایش ناگهانی دما شده و برای قلب راکتور آسیب زاست. لذا یکی از موارد مهم که در طراحی ها لحاظ می شود این است که شار حرارتی تا حالت بحرانی، آستانه ای ایمنی مناسبی داشته و یا به عبارتی مقدار MDNBR از حدی کمتر نشود (معمولا ۱٫۳ [۱۸])، که در این شبیه سازی مقدار MDNBR از حاشیه ایمنی بالایی برخوردار است. همچنین در این مدل سازی پارامترهای مربوط به گاز هلیوم محبوس در حفره مرکزی سوخت و در فضای بین سوخت و غلاف از جمله تغییرات دما، فشار و چگالی آن بررسی گردید.

۶- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

T	دما، °C
P	فشار، Pa
X	کیفیت بخار در ورودی
h	آنتالپی تبخیر، J/kg
K	ضریب هدایت حرارتی سوخت، w/m.K
t	زمان، s
q	توان، W
Nu	عدد ناسلت
Re	عدد رینولدز
Pr	عدد پرانتل
Gr	عدد گرافش
C	ظرفیت حرارتی ویژه سوخت، J/kg.°C
G	شار گرمی سیال، kg/m ² .s

D	قطر، m
A	مساحت، m ²
m	دبی جرمی، kg/s
علائم یونانی	
ρ	چگالی، kg/m ³
v	سرعت، m/s
ψ	ضریب عدد ناسلت
μ	ویسکوزیته، N.s/m
λ	ضریب ویسکوزیته ثانویه
α	ضریب خلاء
زیر نویس ها	
in	ورودی
j	خروجی
g	بخار
f	آب
h	هیدرولیکی
i	ورودی

۷- مراجع

- [1] Marakis, J., Papapavlou, C., Kakaras, E., "A parametric study of radiative heat transfer in pulverised coal furnaces", *Int. J. Heat Mass Transf*, Vol. 43, No. 16, pp. 2961–2971, (2000).
- [2] Spinnler, M., Winter, E.R., Viskanta, R., "Studies on high-temperature multilayer thermal insulations", *Int. J. Heat Mass Transf*, Vol. 47, No. 7, pp. 1305–1312, (2004).
- [3] Mezrhab, A., Bouali, H., Amaoui, H., Bouzidi, M., "Computation of combined natural-convection and radiation heat-transfer in a cavity having a square body at its center", *Apply Energy*, Vol. 83, pp. 1004–1023, (2006).
- [4] Vivek, V., Sharma, A.K., Balaji, C., "Interaction effects between laminar natural convection and surface radiation in tilted square and shallow enclosures", *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 60, pp. 70–84, (2012).
- [5] Martyushev, S.G., Sheremet, M.A., "Conjugate natural convection combined with surface thermal radiation in a three-dimensional enclosure with a heat source", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 73, pp. 340–353, (2014).
- [6] Aghaie, M., Zolfaghari, A., and Minuchehr, A., "Coupled neutronic thermal-hydraulic transient

¹ Minimum Departure from Nucleate Boiling Ratio

- of Nuclear Energy Science and Technology*, Vol. 14, No. 3, pp. 264-279, (2021).
- [17] Arshi, S., Safaei, S., Mirvakili, M., and Faghihi, F., "Modified COBRA-EN code to investigate thermal-hydraulic analysis of the Iranian VVER-1000 core", *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 52, No. 6, pp. 589-595, (2010).
- [18] Russia Federal Agency on Nuclear Energy, Bushehr NPP final safety analysis report, Moscow, (2005).
- [19] Hanisch, T., Zedler, P., Hurtado, A., Rüdiger, F., Fröhlich, J., "Numerical and experimental analysis of flow and heat transfer in a fuel assembly mock-up with transverse flow above the rods", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 89, pp. 108-809, (2021).
- [20] Tikadar, A., Najeeb, U., Titan C., Paul, S.K., Azzam, O., Salman, S., Ahmed M., Abir, L.A., Carrilho, J.A., "Numerical investigation of heat transfer and pressure drop in nuclear fuel rod with three-dimensional surface roughness", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 126, Part B, pp. 493-507, (2018).
- [21] Basile, D., Beghi, M., Chierici, R., Salina, E., Brega, E., "COBRA-EN: an upgraded version of the COBRA-3C/MIT code for thermal hydraulic transient analysis of light water reactor fuel assemblies and cores", *ENELCRTN*, Milano, (1999).
- [22] Incropera, F. P., DeWitt, D.z P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., Introduction to zHeat transfer, 5th eddition, pp. 42-68, (Translated by A.A. Rostami, M. Shirazi), *Isfahan University of Technology Publication Center*, (2013). (in Persian فارسی)
- [23] EL-WAKIL, M. M., "Nuclear Heat Transport", *The American Nuclear Society*, 3rd Edition, (1981).
- [24] Todreas, N. E., and Kazimi, M.S., "Nuclear Systems II Elements of Thermal Hydraulic Design", *Hemisphere publishing corporation*, New York, (1990).
- [25] Yu, J., Wang, S., Jia, B., "Development of sub-channel analysis code for CANDUSCWR. Prog", *Nucl. Energy*, Vol. 49, pp. 334-350, (2007).
- analysis of accidents in PWRs", *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 50, pp.158–166, (2012).
- [7] Wang, Q., Chen, X., Yi-chong, X., "Accident like the Fukushima unlikely in a country with effective nuclear regulation: literature review and proposed guidelines", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 17 pp. 126–146, (2013).
- [8] Mochizuki, H., "Analysis of the chernobyl accident from 1:19:00 to the first power excursion", *Nucl. Eng. Des.*, Vol. 237, pp. 300–307, (2007).
- [9] U.S. Nrc, Backgrounder on the three mile island accident, *United State Nucl. Regul.*, Comm., pp1-7, (1979).
- [10] IAEA, "Thermophysical properties database of materials for light water reactors and heavy water reactors", *Int. Atom. Energy Agency*, http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/118/37118326.pdf, (2006).
- [11] IAEA, Computational analysis of the behaviour of nuclear fuel under steady state, transient and accident conditions, *Int. Atom. Energy Agency*, <https://www.taodocs.com/p-50010983.html>, (2007).
- [12] Wilhelm, P., Jobst, M., Schäfer, F., Kliem, S., "Severe accident research activities at Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)", *Kerntechnik*, Vol. 81, pp. 134–137, (2016).
- [13] Aounallah, Y., "Simulation of HALDEN IFA-650 loss-of-coolant accidents test with TRACE", *Kerntechnik*, Vol. 77, pp. 316–323, (2012).
- [14] Horhoianu, G., Serbanel, M., Diaconu, C., "Investigation of the Ru-43LV fuel behaviour under LOCA conditions in a CANDU reactor", *Kerntechnik*, Vol. 77, pp. 356–364, (2012).
- [15] Faghihi, F., Mirvakili, S.M., Safaei, S., and Bagheri, S., "Neutronics and sub-channel thermal-hydraulics analysis of the Iranian VVER-1000 fuel bundle", *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 87, No. 6, pp. 39-46, (2016).
- [16] Sadeghiazad, M.M., Choobdar, F., "Investigation of thermal-hydraulic transient analysis of hot fuel rod in the pump failure accident", *International Journal*